



Rétines courbes : une approche bio-inspirée de simplification et miniaturisation des systèmes infrarouge

Delphine Dumas

► To cite this version:

Delphine Dumas. Rétines courbes : une approche bio-inspirée de simplification et miniaturisation des systèmes infrarouge. Autre [cond-mat.other]. Université de Grenoble, 2011. Français. NNT : 2011GRENY065 . tel-00680096

HAL Id: tel-00680096

<https://theses.hal.science/tel-00680096>

Submitted on 17 Mar 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité **Physique / Physique des Matériaux**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Delphine DUMAS

Thèse dirigée par **Jérôme PRIMOT** et
codirigée par **Etienne le Coarer** et **Manuel FENDLER**

préparée au sein du **CEA Léti DOPT LPA**
dans l'**École Doctorale de Physique**

Rétines courbes : Une approche bio-inspirée de simplification et miniaturisation des systèmes infrarouge

Thèse soutenue publiquement le **jeudi 8 décembre 2011**,
devant le jury composé de :

Mr Manuel FENDLER

Expert sénior, CEA, Léti, DOPT LPA Grenoble, Membre

Mr Karim INAL

Professeur, CMP-GC Gardanne, Rapporteur

Mr Etienne LE COARER

Ingénieur de recherche, IPAG Grenoble, Directeur de thèse

Mr Jean-Louis MONIN

Directeur IPAG, Grenoble, Président

Mr Jean-Baptiste MOULLEC

Ingénieur en optronique, DGA Bagneux, Membre

Mr Jérôme PRIMOT

Ingénieur de recherche, ONERA DOTA Palaiseau, Directeur de thèse

Mr Franck RUFFIER

Chargé de Recherche, CNRS Biorobotique Marseille, Membre

Mr Didier TIPHENE

Directeur adjoint LESIA, OBSPM, Rapporteur



Remerciements

Débutons ce manuscrit par les nombreux remerciements que mon sujet et ces trois années me semblent mériter. Je commencerai tout d'abord par les membres de mon jury qui m'ont fait l'honneur et le plaisir de juger mon travail. Merci aux rapporteurs, messieurs Karim Inal et Didier Tiphène, qui ont parcouru avec attention mon manuscrit ; je les remercie tout particulièrement pour leurs rapports élogieux. Je remercie également les membres du jury, monsieur le président Jean Louis Monin et messieurs Franck Ruffier et Jean-Baptiste Moullec pour leur intérêt dans mon travail et les discussions enrichissantes que nous avons eues.

Je remercie également toutes les personnes qui sont venues à ma soutenance et que j'ai rencontrées au cours de mes travaux de thèse. Je pense notamment à Philippe Laporte pour son investissement dans l'épanouissement de mon sujet, et à son équipe de l'Observatoire de Paris à Meudon, en particulier Fanny Chemla. Je remercie également les différents membres de la DGA et de l'IPAG que j'ai rencontrés ainsi que le LAM avec Emmanuel Hugot, Marc Ferrari et leur équipe. Je remercie également les industriels : Ulis, Thalès Angénieux, Sagem qui m'ont permis de leur présenter les détecteurs courbés. Merci notamment à messieurs Joël Rollin, Bruno Coumert, Christophe Remontet pour leur investissement dans mon sujet et l'évaluation de cette solution sur leurs propres systèmes.

Dans le cheminement vers mon sujet de thèse, je remercie toute l'équipe du projet TEMOIN (ONERA, CEA, DGA) dont Guillaume Druart, Nicolas Guérineau, Joël Deschamps. L'évolution des caméras infrarouge vers les systèmes bio-inspirés m'a offert un sujet de thèse magnifique : scientifiquement très large, porteur et qui m'a permis d'intéresser facilement les non-initiés !

Un profond remerciement ira donc à mon directeur de thèse Jérôme Primot. Un merci tout particulier pour ma dernière année et la dernière ligne droite de l'été ; merci pour son soutien en optique, ses encouragements et sa disponibilité même en vacances au milieu des cigales. Je remercie également mon deuxième directeur de thèse Etienne le Coarer pour son engouement scientifique sur tous les domaines, et l'opportunité qu'il m'a offerte d'ouvrir mes travaux aux domaines de l'astronomie. Un grand merci pour cette ouverture scientifique et les discussions larges et variées. Jamais deux sans trois, je remercie donc mon encadrant de thèse Manuel Fendler, qui m'a suivie durant ces trois années en assurant avec classe cette fonction. Merci de m'avoir offert cette autonomie et de m'avoir fait confiance dans les travaux, les conférences et l'évolution du sujet.

Ce n'était pas un encadrant à proprement dit, mais je lui dois beaucoup, autant pour m'avoir attirée à Grenoble que pour y être restée, je ferai donc un énorme merci à Christophe Largeton, mon fameux ex-tuteur de stage. Merci pour la formation du bon scientifique, le souci du détail, et les quelques mois à faire ce rapport de conception, sans oublier les matchs de tennis !

J'en arrive donc à remercier l'ensemble du département optronique, du service STM que j'ai côtoyé durant ces trois années et les six mois de stage. Je profite de ces pages pour remercier plus particulièrement certains d'entre eux : les chefs du DOPT et Raymond Boch pour m'avoir accepté en stage puis en thèse dans son service, et pour son charisme très motivant sans oublier les directeurs de ligne programme et chefs de projet qui ont suivi mes travaux ainsi que Véro et Florence.

Un très grand merci aux mains expertes de Gilbert Gaude sans qui les bolomètres courbés n'auraient pas été possibles. Je remercie également toute l'équipe LPFE (Sylvain, Guillaume, Franck, Olivier...) pour leur continuel intérêt pour mes travaux et leur bonne humeur qui contamine tout le couloir. Un merci tout particulier à Laetitia pour le temps que nous avons passé sur les masques et la réalisation des matrices CdHgTe type œil d'insectes ; c'est un chef d'œuvre !!! C'est aussi un merci spécifique à Laurent, avec qui j'ai passé de très bons moments de détente et de re-motivation. Merci aussi à l'équipe caractérisation avec Baptiste, Nicolas, André, Eric, Pierre qui ont permis d'obtenir des FTC et de belles images infrarouge merci donc à tout le LCA, ainsi que l'équipe bolo avec notamment Valérie, Agnès, Claire et Jean Jacques.

J'en arrive ainsi, à mon propre laboratoire le LPA, sur lequel je pourrai remplir de nombreuses feuilles ! C'est un énorme merci à Hervé et toute l'équipe pour la bonne ambiance qui a régné dans le labo, l'open space et au bad. Merci pour le soutien dans les manips, les idées saugrenues mais efficaces, comme le cuisto dingo (idée de François), le double douve (idée de Charly), le latex (merci Lydie), les trucs et astuces de Gilles, le coup de main en polissage d'Alain et de Julien à la découpe. Et un énorme merci pour l'habilité, le soutien, le sourire de Fred, « ma machine », qui face aux bolo et cmos amincis, tordus, ou presque mort, a pu en faire des winners ! Un grand merci également au carré VIP (Manu, Gilles et Charly) complété des forbans Johannes, Fred, Alex qui n'étaient pas en reste pour être créatifs en fin d'après-midi... et merci Nacer pour les fins de journée en tête à tête dans l'open space.

Un merci aux anciens doctorants comme François qui m'a motivée et rassurée sur mon travail et Gwladys qui « est passée par là avant ». Et un grand courage aux suivants : Johannes, Baptiste, Frédérique, Gautier, et plus tard Kevin. Dans cette catégorie, j'adresse de grands mercis et du courage à Charlotte ; la connexion Grenoble – Marignane a été plus que bénéfique durant les durs et étranges moments de la vie de thésarde.

Me voici arrivée dans mes nombreux mercis, hors de la sphère professionnelle. Je fais de grands mercis à tous mes Loulous, qui ont suivi les aventures de mes détecteurs courbés et qui de St Etienne, Grenoble, Reims ou Vif, Aix en Provence et Toulouse m'ont encouragée, supportée et qui m'ont sortie ces derniers mois.

Force est de constater que je ne peux finir sans remercier ma famille. De mes grands parents qui ont participé à la réussite technologique de la courbure de détecteurs, à mes parents, ma sœur et Juvé qui ont d'une part suivi et encouragé mes travaux mais également, dont le travail de « petites mains » a été plus que bénéfique dans la rédaction et ma soutenance.

Table des Matières

INTRODUCTION	1
CHAPITRE A: POURQUOI COURBER UN DETECTEUR ?	5
Introduction	5
A.I - Conception des systèmes optiques : mise en évidence des aberrations	6
A.I.1 - Systèmes optiques et aberrations.....	7
A.I.1.1 - Déformation du front d'onde.....	7
A.I.1.2 - Fonction d'aberration	9
A.I.2 - Descriptions des aberrations.....	11
A.I.2.1 - Aberration chromatique.....	11
A.I.2.2 - Aberrations géométriques	11
A.I.2.3 - Diminution des aberrations par les choix de conception.....	14
A.I.3 - Méthodes de miniaturisation	16
A.I.3.1 - Conservation de l'architecture standard.....	17
A.I.3.2 - Modification de l'architecture	17
A.II - Courbure des détecteurs pour supprimer l'aberration de courbure de champ.....	21
A.II.1 - Mise en évidence de l'aberration de courbure de champ.....	21
A.II.2 - Correction de la courbure de champ : des systèmes traditionnels à la courbure du plan focal.....	25
A.II.2.1 - Système à une lentille.....	25
A.II.2.2 - Système à plusieurs lentilles	25
A.II.2.3 - Systèmes à miroirs, correction par lentilles.....	28
A.II.2.4 - Systèmes à miroirs	29
A.II.3 - Les avantages optiques du système avec un plan focal courbé.....	30
A.II.3.1 - Qualité optique : FTM.....	31
A.II.3.2 - Qualité optique : éclairage	32
A.II.3.3 - Conception optique	35
A.III - Applications des détecteurs courbés	37
A.III.1 - Applications dans l'analyse spectrale	37
A.III.2 - Applications d'astronomie	41
A.III.2.1 - Etude de faisabilité de l'ESO	42
A.III.2.2 - Projet OPTIMOS-EVE.....	43
A.III.3 - Applications des caméras miniatures dans le domaine militaire.....	46
A.III.3.1 - Application industrielle : jumelles infrarouge.....	47
A.III.3.2 - Caméra en rupture : œil d'insecte	48
A.III.3.3 - Caméra miniature : chambre noire	53
Conclusion du premier chapitre	55
CHAPITRE B : LA PHYSIQUE DE LA COURBURE	57
Introduction	57
B.I - Mise en forme d'une sphère	59
B.I.1 - Analyse géométrique.....	59

B.I.1.1 - Définitions mécaniques	59
B.I.1.2 - Calculs analytiques.....	62
B.I.1.3 - Influence de l'épaisseur.....	65
B.I.2 - La courbure par une structuration du composant.....	66
B.I.2.1 - Structures en triangle type projection de Fuller	66
B.I.2.2 - Avantage des petites structures	67
B.I.2.3 - Etat de l'art.....	68
B.I.3 - Courbure pleine plaque	71
B.I.3.1 - Amincissement partiel.....	71
B.I.3.2 - Courbure par la réalisation d'un bilame.....	72
B.I.3.3 - Courbure par l'amincissement du composant	74
B.II - Développement du procédé de courbure	77
B.II.1 - Mise en forme sphérique du composant.....	77
B.II.1.1 - Description du procédé de courbure.....	77
B.II.1.2 - Mise en forme sphérique par contact	78
B.II.1.3 - Evaluation du procédé : résultats de courbure	80
B.II.2 - Optimisation du procédé par l'outil	82
B.II.2.1 - Gabarit de l'outil	82
B.II.2.2 - Position de l'outil	83
B.II.3 - Maintien de la forme sphérique.....	83
B.II.3.1 - Interface de collage	83
B.II.3.2 - Support de courbure	85
B.III - Courbure d'échantillons de silicium : étude matériau.....	88
B.III.1 - Etude de la courbure convexe	88
B.III.1.1 - Influence du rayon de courbure.....	88
B.III.1.2 - Influence de l'épaisseur sur la courbure.....	91
B.III.1.3 - Amplitudes des pliures.....	93
B.III.2 - Orientation de courbure : expériences et simulations	96
B.III.2.1 - Résultats de courbure concave	96
B.III.2.2 - Simulations de la courbure.....	98
B.III.3 - Simulation de l'ensemble du procédé de courbure	101
B.III.3.1 - Description de la simulation.....	101
B.III.3.2 - Résultats pour une épaisseur de 50 μm	102
B.III.3.3 - Influence de l'épaisseur.....	105
Conclusion du deuxième chapitre	107
 CHAPITRE C: LA COURBURE DE DETECTEURS	 109
Introduction	109
C.I - Courbure du circuit de lecture Si-CMOS.....	112
C.I.1 - Adaptation du procédé de courbure pour les circuits fonctionnels	113
C.I.1.1 - Intégration du composant	113
C.I.1.2 - Adaptation de l'étape de report sur céramique.....	114
C.I.1.3 - Adaptation de l'étape de câblage.....	115
C.I.2 - Courbure du Si-CMOS.....	116
C.I.2.1 - Evaluation du circuit Si-CMOS par rapport au silicium nu	116
C.I.2.2 - Résultats de courbure Si-CMOS	117
C.I.3 - De l'amincissement à la courbure : comportement électrique	120
C.I.3.1 - Préparation des circuits aux tests électriques	120

C.I.3.2 - Résultats des tests électriques	122
C.II - Les détecteurs photovoltaïques	125
C.II.1 - Technologie des détecteurs photovoltaïques infrarouge	125
C.II.1.1 - Le fonctionnement des détecteurs infrarouge refroidis	125
C.II.1.2 - Technologie des détecteurs infrarouge refroidis	127
C.II.2 - Circuit de détection de type œil d'insecte	130
C.II.2.1 - Stratégie de courbure	130
C.II.2.2 - Matrice modifiée de type « œil d'insecte »	131
C.II.3 - Comportement électrique du circuit modifié	141
C.II.3.1 - Influence de la gravure	141
C.II.3.2 - Matrice « œil d'insecte »	143
C.III - La courbure des bolomètres	147
C.III.1 - Rappel du fonctionnement des bolomètres	147
C.III.2 - Courbure des bolomètres sur réseau d'interconnexion	148
C.III.2.1 - Procédé de courbure utilisé	149
C.III.2.2 - Résultats de courbure	150
C.III.2.3 - Influence de la courbure sur les pixels	152
C.III.2.4 - Analyse électrique	153
C.III.3 - Courbure des bolomètres fonctionnels	154
C.III.3.1 - Résultats de courbure	154
C.III.3.2 - Etude électrique des bolomètres amincis	158
C.III.3.3 - Etude des bolomètres courbés	159
Conclusion du troisième chapitre	162
Résultats de courbure	162
Comportement électrique	163
 CHAPITRE D: CARACTERISATIONS OPTIQUES DE BOLOMETRES	165
Introduction	165
D.I - Adaptation mécanique et technologique pour réaliser un système imageant.....	166
D.I.1 - Premières images et adaptation technologique	166
D.I.1.1 - Sélection d'un nouveau support	168
D.I.1.2 - Alignement de l'axe optique	169
D.I.1.3 - Supports décentrés.....	172
D.I.2 - Ingénierie des systèmes optiques	174
D.I.2.1 - Systèmes d'études de la thèse	174
D.I.2.2 - Intégration des éléments optiques	176
D.I.3 - Mise au point de la mesure FTM	178
D.I.3.1 - Techniques de mesure	178
D.I.3.2 - Montage expérimental.....	179
D.II - Système à deux lentilles	183
D.II.1 - Système à deux lentilles	183
D.II.1.1 - Dimensionnement du système.....	183
D.II.1.2 - Tolérance de montage	184
D.II.1.3 - Montage optique.....	185
D.II.2 - Images infrarouge obtenues.....	186
D.II.2.1 - Images du système avec détecteur courbé.....	186
D.II.2.2 - Comparaison des systèmes optimisés plan et courbé.....	186
D.II.3 - Caractérisation électro-optique sur les systèmes à deux lentilles	187
D.II.3.1 - Fonction de Transfert de Modulation (FTM) théorique.....	187
D.II.3.2 - Résultats expérimentaux	189

D.II.3.3 - Comparaison théorie et expérience	192
D.III - Système bio-inspiré : l'œil infrarouge	197
D.III.1 - Système optique à une lentille	197
D.III.1.1 - Montage optique de l'œil infrarouge	198
D.III.1.2 - FTM théorique des systèmes avec un détecteur plan et courbé	200
D.III.1.3 - Système optimisé pour le détecteur plan	201
D.III.2 - Images obtenues par l'œil infrarouge	202
D.III.3 - Etude électro-optique des systèmes œil humain	204
D.III.3.1 - FTM théorique	204
D.III.3.2 - Résultats expérimentaux	206
D.III.3.3 - Comparaison des résultats avec la théorie	207
Conclusion du quatrième chapitre	213
 CONCLUSION	 215
REFERENCES	223

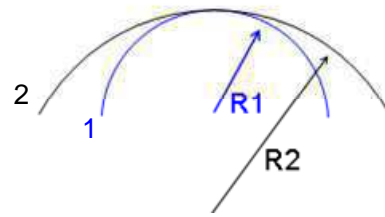
Glossaire

Etant donné que mon sujet de thèse s'appuie sur trois domaines distincts : l'optique, la mécanique et la micro-technologie, ce glossaire va me permettre de définir les notions utilisées. Du fait de cette pluridisciplinarité, certaines définitions seront simplifiées pour le manuscrit.

Courbure & Rayon

Ces deux notions seront prépondérantes dans le manuscrit.

Il est plus naturel d'appréhender la courbure d'un élément, cependant, le rayon sera le terme employé pour caractériser les résultats expérimentaux. Une courbure plus importante est obtenue pour de plus faibles rayons.



Courbure 1 > courbure 2

Rayons R : R1 < R2

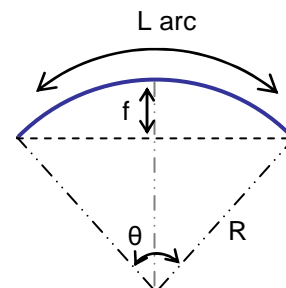
Concave & Convexe



Calculs entre paramètres

Larc : Longueur d'arc, *R* : rayon, *f* : flèche, θ : angle au centre

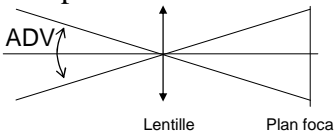
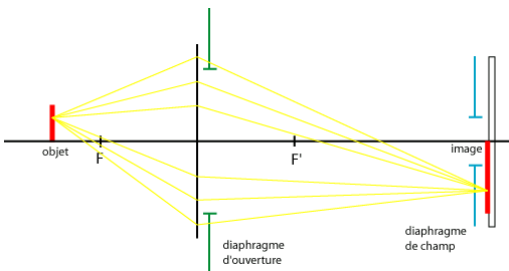
$$Larc = R \cdot \theta \text{ et } f = R \left(1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)$$

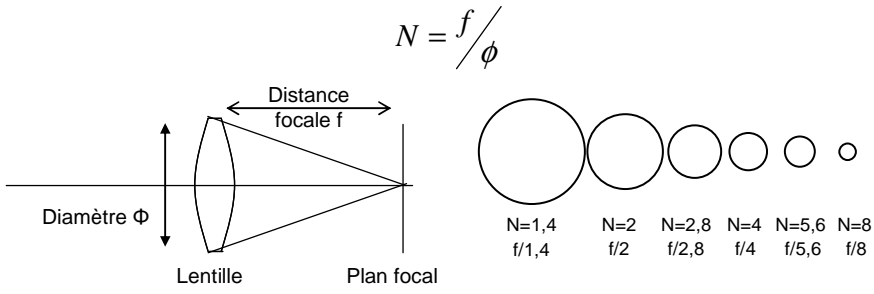


Caractérisation de courbure

Surface parfaitement sphérique	Surface d'une sphère exacte qui est déduite de la surface réelle de courbure.
Surface des écarts à la sphère	Représente les écarts de la surface de courbure réelle avec une sphère parfaite. Idéalement, une courbure parfaite aurait une surface des écarts à la sphère qui est plane. Sur les résultats de courbure obtenus, cette surface représente les écarts de la surface réelle par rapport à la sphère parfaite ; elle montre les pliures et déformations locales. L'écart à la sphère peut également être vu comme un « défaut de planéité »

Notions d'optique & photométrie

<p>ADV</p> <p>(en degré)</p>	<p>Angle De Vue ou Champ</p> 
Anastigmat	Système sans astigmatisme.
Aplanétique	Système corrigé des aberrations sphériques et de coma.
Asphérique (lentille)	Surface différente d'une forme parfaitement sphérique. Les surfaces de la lentille ont une section conique (parabolique, ellipsoïdale ou hyperbolique).
Diaphragme	<p>de champ : restreint la zone visible de l'objet.</p> <p>d'ouverture : diminue le flux lumineux, soit par le diamètre de la lentille soit par une ouverture mécanique</p> 
Dispersion (en caractérisation optique) en %	Ecart entre le minimum et le maximum de la réponse FTM ou FTC d'un système.
Eclairement ($W.m^{-2}$) : H	Rapport du flux énergétique reçu par unité de surface
Emittance ($W.m^{-2}$)	Rapport du flux lumineux émis par unité de surface S.
f (en mm)	Distance focale
Fonction d'aberration : W	Ecart du front d'onde avec la référence sphérique.
FTM	<p>Fonction de Transfert de Modulation</p> <p>Détermine la performance en qualité image d'un système optique en évaluant la perte de contraste associée à l'observation de mires périodiques de pas de plus en plus fins.</p>
Luminance ($W.m^{-2}.sr^{-1}$)	<p>Puissance de rayonnement d'un corps émise par unité de surface, par unité d'angle solide et de longueur d'onde</p> <p>Elle correspond à l'intensité d'une petite zone de la source, c'est-à-dire l'intensité par unité d'aire apparente, dans une direction donnée.</p> $L = \frac{d^2 F}{dA \cdot \cos \theta_s d\Omega}$ <p>L'angle θ_s est l'angle entre la direction d'émission et la normale de la</p>

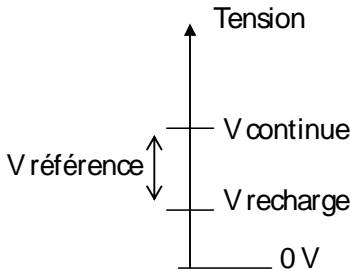
	zone locale à la source.
n	Indice de réfraction d'un milieu.
<p>Nombre d'ouverture</p> <p>N ou $f/\#$</p>	<p>Ouverture relative du système déterminant l'éclairement de la lentille. Rapport de la longueur focale effective et du diamètre du pupille d'entrée</p> $N = f / \phi$  <p>Plus le nombre d'ouverture est faible, plus l'ouverture est grande et la lentille est dite rapide.</p>
<p>Nyquist (fréquence) (cycle/mm)</p>	<p>Fréquence spatiale de la limite de diffraction imposée par la taille du pixel du détecteur.</p> $v = \frac{1}{2 \cdot \text{pas pixel}}$
Ouverture (mm)	Diamètre d'une surface ou lentille au travers de laquelle la lumière est transmise.
Paraxiale (zone)	<p>Région proche de l'axe optique où les angles sont infinitésimaux (condition de Gauss).</p> <p>Equations linéaires décrivant une image théorique sans aberration.</p>
Pupille d'entrée ou de sortie	<p>Pupille d'entrée d'un instrument est l'image géométrique virtuelle du plus petit diaphragme par les lentilles placées devant ce diaphragme.</p> <p>Pupille de sortie est l'image géométrique de la pupille d'entrée.</p>
Résolution (cycles/mm ou angle)	<p>Capacité du système à distinguer deux points distincts.</p> <p>Plus les points sont proches, meilleure sera la résolution.</p>
Sagittal (plan)	Plan perpendiculaire au plan tangentiel incluant le rayon principal, qui est le rayon oblique passant par le centre du diaphragme d'ouverture.
Tangentiel (plan)	Tous les plans incluant l'axe optique.

Notions de mécanique

α	Coefficient de dilatation thermique	Coefficient d'expansion à pression constante du volume d'un corps occasionné sous effet thermique.
σ	Contrainte (tenseur) (σ en Nm^{-2} ou Pa)	Caractérisation de l'état de contrainte d'un point dans un repère cartésien défini par les axes 1,2,3. $\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$
$\sigma_{rupture}$	Contrainte à la rupture	Contrainte limite menant à la rupture de la structure.
C_{ij}	Constantes de raideur	Définissent l'élasticité des structures anisotropes.
ε	Déformation (sans dimension)	
E	Module de Young (GPa)	
f	Flèche de la courbure (μm ou mm)	
	Mise en forme sphérique	Procédé de courbure afin de passer d'un plan à une calotte sphérique
M	Modules biaxiaux (Pa)	Rapport entre le module de Young E et le coefficient de Poisson ν $M = \frac{E}{(1-\nu)}$
ν	Coefficient de Poisson (Sans unité)	
	Potentiel de courbure	Capacité du circuit à se déformer pour former une calotte sphérique
	Contrainte équivalente selon le critère de von Mises	<p>Critère d'évaluation de contrainte. Considérant le tenseur des contraintes principales :</p> $\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix}$ <p>Il s'écrit comme la somme d'un tenseur de contrainte moyenne et un tenseur déviateur S de contraintes La contrainte équivalente de von Mises s'écrit</p> $\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \sum_{ij} S_{ij} S_{ji}}$

Notions de micro-technologie

Bolomètre	Détecteur infrarouge non refroidi, détecteur thermique.
CdHgTe	Matériau sensible au rayonnement infrarouge. Semi-conducteur ternaire composé de Cadmium Mercure Tellure.
Corps noir (défini par sa température K)	Corps parfait absorbant totalement tout rayonnement incident quelles que soient la longueur d'onde et la direction de propagation. Il peut également émettre une radiation à toutes les longueurs d'onde.
CMOS	Complementary Metal Oxide Semi-conductor. Circuit de lecture des composants infrarouge.
Cryostat	Environnement thermique dédié aux détecteurs infrarouge refroidis, fonctionnement sous vide et à froid (77 K).
CTD	Contact diode reliant la zone dopée n avec une entrée du circuit de lecture par une bille d'indium.
CTS	Contact substrat, reliant la zone dopée p avec une entrée du circuit de lecture par une bille d'indium.
Déstressage	Technique (traitement chimique ou plasma) visant à diminuer les contraintes résiduelles dans le matériau suite à l'amincissement ; élimination des défauts cristallins générés.
Dispersion en % (en test électrique)	Rapport entre l'écart type et la moyenne de la grandeur électrique (tension ou bruit) mesurée.
ETSV	Enceinte Thermique Sous Vide : environnement thermique dédié aux bolomètres, fonctionnement sous vide ($\sim 10^{-6}$ mbar).
Hybridation	Technique d'interconnexion de deux circuits, ici effectué par une brasure d'indium.
Intégration d'un composant	Différentes étapes réalisées en fin de fabrication technologique afin de connecter électriquement le composant et le rendre fonctionnel ; comprend les étapes de collage sur céramique, connexion par câblage filaire, et montage dans un environnement thermique adapté.
Libération	Etape de fin de procédé de fabrication des bolomètres où le polymère entre le circuit CMOS et les plaques sensibles est enlevé par gravure plasma.
Module à effet Peltier	Module permettant la régulation thermique des circuits. Basé sur l'effet Peltier qui est un phénomène de déplacement de chaleur en présence d'un courant électrique.
MOSFET	Transistor MOS à effet de champ à grille isolée (Field Effect Transistor). Composant unipolaire (un seul porteur de charge) dont le principe repose sur l'effet du champ électrique appliqué sur la structure MOS (Métal Oxyde Semi-conducteur).
Niveau de recharge (en volt)	Tension et bruit du composant au repos.
Niveau de référence (en volt)	Tension et bruit du composant actif, c'est-à-dire lorsqu'il détecte un rayonnement infrarouge, après suppression du niveau de recharge. Test réalisé face à un corps noir rayonnant à une température fixée.

	
NETD (en mK)	Noise Equivalent Temperature Difference Rapport entre le bruit du circuit et la réponse en tension aux deux températures du corps noir.
Réponse en tension ou en courant (en mV/K ou mA/K)	Différence de tension ou courant mesuré pour un écart en températures du corps noir.
SOI	Silicon On Insulator : substrat de silicium de fine épaisseur fabriqué sur isolant et silicium.
Surface sensible Surface active Matrice de pixels	Surface du détecteur utile à la détection infrarouge ; surface de pixels.
TV (format)	Format des détecteurs infrarouge Format TV : 640x512 pixels → Format TV/4 : 320x256 pixels

INTRODUCTION

Les caméras sont de plus en plus présentes dans notre environnement, par exemple dans les téléphones portables, les ordinateurs, l'automobile, la vidéosurveillance, l'ingénierie médicale... Leur nombre ne fait qu'augmenter, et le besoin s'oriente vers des systèmes basse consommation, de faible volume et de faible coût, pour des domaines d'utilisation très variés. Suivant l'évolution des caméras dans le visible, les systèmes de vision infrarouge font également leur apparition dans notre vie quotidienne (Yole Développement 2011). La détection dans cette bande spectrale permet par exemple d'améliorer la sécurité routière la nuit (Schreiner 1999), de détecter les personnes dans une rue déclenchant ainsi un éclairage visible approprié, ou de rechercher les points chauds pour la sécurité incendie (Dobigny 2011), la thermographie de bâtiments (Clark, McCann, et Forde 2003), l'analyse de défaillance des composants électroniques... Pour s'adapter à ce marché croissant et à ces nouvelles applications, les caméras infrarouge doivent être moins volumineuses et moins coûteuses.

La recherche de la miniaturisation des systèmes est un enjeu important, qui concerne tant les fabricants de composants que les systémiers. L'industrie microélectronique basée sur la technologie MOS (Métal Oxyde Semiconducteur) a, depuis son origine, cherché à augmenter le nombre de transistors sur une puce tout en diminuant leur taille ; cette problématique suit la loi de Gordon Moore (Schaller 1997) et a permis l'essor des technologies embarquées aux dimensions de plus en plus réduites et faibles consommatrices d'énergie. La technologie infrarouge, initialement moins dédiée à l'utilisation grand public, n'a pas suivi la même évolution. En effet, l'environnement (cryogénique ou contrôlé en pression) des caméras infrarouge détermine le volume du système complet. L'architecture optique placée à l'extérieur de l'enceinte, conditionne également le volume global. Afin de répondre aux nouveaux besoins de systèmes enfouis, notamment dans les applications militaires, il est devenu indispensable de miniaturiser les caméras, et par la même, le système optique.

Différentes méthodes technologiques existent. La méthode la plus « simple » consiste à supprimer des lentilles de l'architecture du système. Or, elles sont garantes de la résolution optique, étant donné que leur choix (nature, disposition) permet la correction des aberrations. Ainsi, la suppression de lentilles diminue certes le volume mais dégrade également la qualité optique, ce qui n'est pas acceptable. En effet, la miniaturisation doit aller de pair avec la conservation, voire même avec l'amélioration de la qualité optique de l'image. Par conséquent, il est nécessaire de trouver une architecture optique équivalente qui conserve la résolution, à moindre coût de dioptries.

Une solution originale est proposée dans cette thèse afin d'éliminer une aberration du système optique. En effet, parmi les défauts que peut avoir la surface focale, il en existe un, l'aberration de courbure de champ, qui peut être supprimé par une modification de la forme du détecteur. Optiquement, elle s'explique par un écart de focalisation des points dans l'axe et hors axe ; les points inclinés par rapport à l'axe optique convergent (pour un système convergent) en avant du plan focal. Ainsi, la surface focale forme une courbe et non un plan sur le détecteur. Cette aberration est donc particulièrement complexe à corriger puisqu'elle est

liée à une contrainte intrinsèque de la conception optique, liée à la planéité de fabrication du plan focal.

La solution que je propose dans ces travaux consiste à développer un nouveau type de détecteurs dont la surface est courbée sphériquement, de telle sorte qu'elle suive la surface focale. En supprimant la courbure de champ par cette nouvelle génération de capteurs, le système est miniaturisé tout en améliorant la qualité optique. Cette option est finalement celle que l'on retrouve dans la nature, et notamment dans l'œil humain. Composé d'une lentille principale et d'une rétine courbée en concave, ce système de détection est très performant. Les avantages cumulés de la courbure et de la capacité d'accommodation de l'œil permettent de s'affranchir des aberrations optiques et en font un excellent exemple de système miniature.

Force est de constater que la nature est un large vivier de systèmes de vision originaux que les architectures optiques artificielles peuvent copier. Notamment, les systèmes visuels des invertébrés tels que les insectes, les crustacés, les araignées..., apparaissent comme une réponse particulièrement innovante à la problématique de miniaturisation. Leurs structures sont de type « œil composé » ou multi-pupillaire et comportent de multiples facettes, 28 000 pour la libellule et 4 000 environ pour la mouche, chacune constituée d'une lentille et d'un ensemble de photorécepteurs (Land 2005). Il existe majoritairement deux organisations de facettes, qui se différencient par leur traitement de données :

- les systèmes apposés où chaque facette voit toute la scène selon leur angle propre ; l'image est le cumul de ces images légèrement décalées,
- les systèmes superposés, où chaque facette voit une partie de la scène et l'image finale est formée par la juxtaposition de chaque portion.

Ces deux structures sont constituées de matrices de lentilles et de photorécepteurs organisées sur des surfaces hémisphériques convexes. Cette organisation permet d'augmenter l'angle de vue, de diminuer les aberrations et de miniaturiser le système par le rapprochement des lentilles au plus près du plan focal. Insectes comme crustacés ont des systèmes visuels très performants pour leurs tailles et leurs besoins. Plusieurs travaux cherchent à s'inspirer de ces yeux composés ; cependant l'intérêt principal réside dans la structure hémisphérique.

La nature propose donc deux solutions originales pour miniaturiser les caméras : l'œil humain ou l'œil multi-pupillaire. Mais contrairement aux caméras actuelles, aucun système naturel n'est composé de rétine plane. Cette courbure, conservée au cours de l'évolution, présente, outre le gain dimensionnel, des avantages optiques considérables, qu'il est intéressant de transférer sur les systèmes artificiels.

Prenant exemple sur la nature, le contexte de ma thèse s'articule autour de la simplification et la miniaturisation des caméras. Plus particulièrement, je me suis concentrée sur le développement technologique de cette nouvelle génération de détecteurs courbés.

Leur courbure sphérique est une réelle révolution dans l'industrie microélectronique. En effet, la planéité est un dénominateur commun à tous les composants de micro-technologie, qui sont développés sur des substrats plans afin de faciliter l'industrialisation et optimiser le rendement. Allant à l'encontre de cette vision et de l'a priori de rigidité des matériaux, j'ai travaillé sur la mise en forme sphérique des circuits monolithiques en cherchant à conserver

leur surface active. La courbure est traitée dans ces travaux comme une suite logique à la fabrication des détecteurs.

Ma thèse a débuté par une remarque : « et si on copiait au plus près la nature en courbant les détecteurs ? ». Partie de cette idée, ces trois années ont mis en évidence le potentiel de cette nouvelle génération de détecteurs dans les différentes applications civiles et militaires. Principalement consacrés à la mise en forme et au développement de plans focaux sphériques, ces travaux ont abouti à la réalisation de caméras infrarouge fonctionnelles. Afin de présenter ces différents points, le manuscrit sera scindé en quatre chapitres.

Le premier présentera l'intérêt optique de courber un détecteur. Tout d'abord, je détaillerai les enjeux de la conception et de la miniaturisation des systèmes, en mettant en évidence la part des aberrations et notamment de la courbure de champ. Par la suite, une étude strictement théorique portera sur les avantages optiques de la courbure de plans focaux. Elle permettra ainsi de comprendre l'intérêt d'utiliser un détecteur courbé dans les applications d'analyse spectrale, d'astronomie et militaires que nous détaillerons au paragraphe suivant sur des instruments réels.

Dans un deuxième chapitre, j'étudierai l'aspect mécanique de la courbure, afin de répondre à la question : « comment courber un substrat silicium initialement plan ? ». Les différentes solutions de mise en forme sphérique seront examinées, et par la suite, je présenterai le procédé de courbure mis en œuvre au cours de ma thèse. Ce procédé a permis d'étudier le comportement à la courbure d'échantillons de silicium amincis. Ces résultats expérimentaux ont été comparés à une étude théorique mécanique grâce à la simulation du comportement du matériau lors de sa courbure sphérique.

Suite à ces essais, le procédé a été transféré aux détecteurs infrarouge fonctionnels. Les deux filières infrarouge principales, les détecteurs thermiques (bolomètres) et quantiques en CdHgTe (Cadmium Mercure Tellure) ont permis, en raison de leurs structures différentes, de travailler sur les deux solutions de miniaturisation décrites précédemment. L'architecture multi-pupillaire a été réalisée sur le détecteur à base de CdHgTe dont le circuit de détection peut être modifié au sein du département optronique du CEA Léti. Le détecteur infrarouge non refroidi (bolomètre) a permis de valider le procédé de courbure sur des capteurs fonctionnels. Le troisième chapitre présentera l'ensemble de ces résultats du point de vue mécanique et électrique.

Enfin, le quatrième et dernier chapitre sera consacré à la caractérisation électro-optique des caméras infrarouge réalisées avec un bolomètre courbé. Deux systèmes ont été réalisés. Le premier, composé de deux lentilles, permettra de mettre en évidence les avantages d'un plan focal courbé par comparaison avec un système traditionnel, constitué d'un détecteur plan. Le deuxième est un système minimaliste. Inspiré de l'œil humain, il est constitué d'une seule lentille et d'une rétine courbée en concave.

CHAPITRE A : POURQUOI COURBER UN DETECTEUR ?

Introduction

Le premier chapitre sera consacré à la problématique suivante : « pourquoi courber un détecteur ? ». Dans l'introduction générale, nous avons mentionné le besoin croissant de caméras miniatures dans de nombreuses applications qui s'adressent tant au grand public qu'aux professionnels. Selon les domaines, les caméras et de manière plus générale les systèmes de détection, se différencient par leurs caractéristiques optiques (angle de vue, ouverture, longueur focale...), leurs architectures et leurs volumes. Néanmoins, tous ces systèmes font face à une même problématique de conception optique. Ils sont constitués d'un agencement parfois très complexe de lentilles, diaphragmes et miroirs, qui tendent à dégrader la qualité optique finale de l'image.

Dans chacun des trois domaines, le grand public, le militaire et l'astronomie, les besoins s'orientent vers une miniaturisation et une augmentation du champ. Ces spécifications concernent des applications précises. Pour les applications grand public, la tendance est principalement à la miniaturisation ; ce marché croissant est porté notamment par la multiplication de caméras intégrées dans les téléphones portables. Un marché s'ouvre également pour des caméras embarquées, par exemple, sur les casques de vélo ou de ski ; ces caméras doivent être miniatures et large champ. L'angle de vue est actuellement entre 130° et 170° , mais le volume et le poids restent des inconvénients majeurs : ces caméras ont un volume de 60 cm^3 à 195 cm^3 et leur poids varie entre 140 g et 180 g (Studiosport 2011). Ce poids déporté vers l'avant du casque n'est pas ergonomique. Les pilotes d'hélicoptères militaires sont confrontés aux mêmes problèmes. Leurs casques sont équipés de caméras, et ce poids déporté en permanence vers l'avant provoque des déplacements au niveau de leurs cervicales (Thuresson et al. 2005). L'enjeu est donc de miniaturiser ces systèmes afin d'en diminuer le volume et le poids. De telles caméras pourraient ainsi s'intégrer dans les équipements qui sont actuellement dépourvus de système de détection.

Les applications militaires recherchent également une augmentation de l'angle de vue. Cet enjeu est important puisqu'il est lié à la capacité d'observation. Un large champ permet une meilleure sécurisation et organisation d'une action militaire. Les drones profitent également de ces travaux de miniaturisation et d'augmentation du champ. Ils sont de plus en plus utilisés dans la stratégie militaire pour faire de la surveillance et réduire ainsi les délais entre l'observation et l'action. Actuellement les drones en action ont une envergure allant de 4 m à 20 m et un poids compris entre 25 kg et 340 kg. Des micro-drones sont en cours de développement ; leur envergure est de 20 cm. Ces systèmes doivent être très légers et furtifs. Ces nouveaux drones peuvent ainsi répondre aux besoins de nombreuses applications civiles comme la surveillance des foules et l'analyse des nuages radioactifs (Brisset 2004). Compacité, légèreté et moindre coût sont donc les objectifs à atteindre.

Un dernier domaine d'intérêt concerne les applications d'astronomie. Parmi les instruments au sol, une classe de télescope très large champ se développe. Ces télescopes permettent de cartographier le ciel et faire de la surveillance. L'augmentation du champ dans ces applications est une priorité afin d'observer une plus grande partie du ciel, et notamment de détecter et reconnaître toutes les sources de lumière dans l'immensité de l'univers. Chaque

lumière dans le ciel est la conséquence d'un phénomène, que ce soit une météorite, une comète, l'explosion d'une supernova ou la mort d'une étoile. La résolution doit être suffisante pour les reconnaître. L'analyse plus précise sera faite par un instrument de faible champ et grande résolution. Néanmoins, l'augmentation du champ de ces télescopes ne doit pas être obtenue au détriment de la résolution. Or, ces deux paramètres n'évoluent pas conjointement. La part de certaines aberrations, notamment l'aberration de courbure de champ, augmente avec l'angle de vue, ce qui dégrade la qualité de l'image. Les systèmes se complexifient afin de corriger ces aberrations. L'objectif est donc de simplifier ces systèmes et de diminuer leur volume.

Afin de comprendre cette problématique de simplification et de miniaturisation des systèmes de détection, ce chapitre sera scindé en trois parties. La première permettra de poser les bases de la conception optique; elle mettra en évidence les aberrations des systèmes optiques. Puis nous focaliserons notre étude sur l'aberration de courbure de champ. Primordiale dans les caméras large champ, cette aberration est responsable de la dégradation optique hors axe. Une solution innovante de correction est apportée par mes travaux; la technique développée consiste à courber le plan focal en accord avec la surface focale. L'élimination de cette aberration permet de simplifier et de miniaturiser les systèmes de détection tout en améliorant la résolution. Ces avantages seront détaillés dans la deuxième partie de ce chapitre, après l'évaluation des systèmes traditionnels de correction dans les systèmes plans. Enfin, la troisième partie permettra d'illustrer ces propos par des applications réelles de systèmes optiques, qui bénéficieraient de détecteurs courbés. Ces systèmes seront comparés avec l'architecture traditionnelle plane, et nous mettrons en évidence ses nombreux avantages. Cette dernière partie permettra d'évaluer l'enjeu de mes travaux de recherche.

A.I - Conception des systèmes optiques : mise en évidence des aberrations

Un système optique est un ensemble d'éléments qui produit une image d'un objet à la taille, la position et l'orientation souhaitées sur un système de détection. Le choix des divers éléments optiques permet de répondre à ces spécifications en définissant les paramètres du système : la longueur focale, l'ouverture et l'angle de vue. Chaque application a des paramètres propres auxquels l'agencement des éléments optiques doit répondre. Par exemple, un télescope doit recueillir le maximum de lumière sans en dégrader la qualité.

Pour un domaine donné (civil, militaire, astronomie...), les besoins varient. Ainsi pour l'astronomie, une classe de télescope est dédiée à la surveillance céleste, et dans ce cas, le champ est souvent privilégié à la résolution. Une autre classe de télescope permet l'analyse d'une zone localisée, et dans ce cas, la résolution sera le facteur primordial au détriment du champ qui sera limité. Il existe donc autant d'architectures de systèmes optiques que de besoins. Dans le domaine militaire, les besoins suivent une classification (détection, reconnaissance, identification) dont la résolution est déterminée selon le critère de Johnson (Holst 2008). Les systèmes de détection permettent de mettre en évidence une présence. Ceux de reconnaissance distinguent la fonction, par exemple une voiture de tourisme ou un char d'assaut. Les systèmes d'identification consistent à différencier le type d'objet, par exemple une Twingo d'une Peugeot 206. Pour chacun de ces besoins, on définit alors les spécificités techniques ; en premier lieu le pas d'échantillonnage et le champ, pour ensuite déterminer la taille du détecteur, la distance focale, les diamètres des pupilles et le pas pixel. Tout le

système est alors défini et l'architecture optique peut être conçue. L'évaluation de l'architecture est obtenue par des figures de mérite telles que la mesure du signal sur bruit et la réponse optique. Ces mêmes analyses seront menées a posteriori sur le système optique réalisé.

Le domaine de la conception optique est donc particulièrement vaste et couvre toute une gamme de besoins ; en réponse à un même cahier des charges, plusieurs architectures existent. L'enjeu est de trouver la meilleure solution par rapport aux spécifications requises, en mettant l'accent sur le champ, la résolution, le volume ou le coût ; le choix se porte généralement sur un compromis entre ces quatre critères. Cette première partie de chapitre sera consacrée à la conception optique et nous détaillerons les aberrations du système, notamment l'aberration de courbure de champ. Nous pourrions ainsi évaluer la complexité des systèmes et l'importance des aberrations dans une architecture optique. Nous nous focaliserons par la suite sur l'aberration de courbure de champ et mettrons en évidence l'influence de cette aberration sur les caméras large champ.

A.I.1 - Systèmes optiques et aberrations

A.I.1.1 - Déformation du front d'onde

Toutes les architectures optiques utilisent des dioptries (lentilles, miroirs...), parfois identiques, mais agencés de manière différente afin de répondre aux spécifications du système. La fonction des éléments optiques est de dévier les faisceaux de telle sorte que l'objet observé soit correctement imagé sur le détecteur ou sur l'œil de l'observateur. La propagation de l'onde lumineuse est parfaitement décrite par la notion de rayon lumineux. Ce faisceau se propage en ligne droite dans l'espace ; néanmoins, le passage dans un milieu quelconque modifie cette trajectoire selon deux paramètres : la vitesse et l'angle par rapport à la normale de propagation de l'onde. Ce changement d'inclinaison à l'interface est décrit par la loi de Snell Descartes ; cette relation très simple est à la base de l'optique géométrique. Etant donné qu'un dioptré a un indice de réfraction différent de l'air, on peut déterminer la déviation du faisceau lumineux afin qu'il converge vers le système de détection. La Figure A-1 illustre la déviation du front d'onde d'un point source au travers d'une lentille plan convexe.

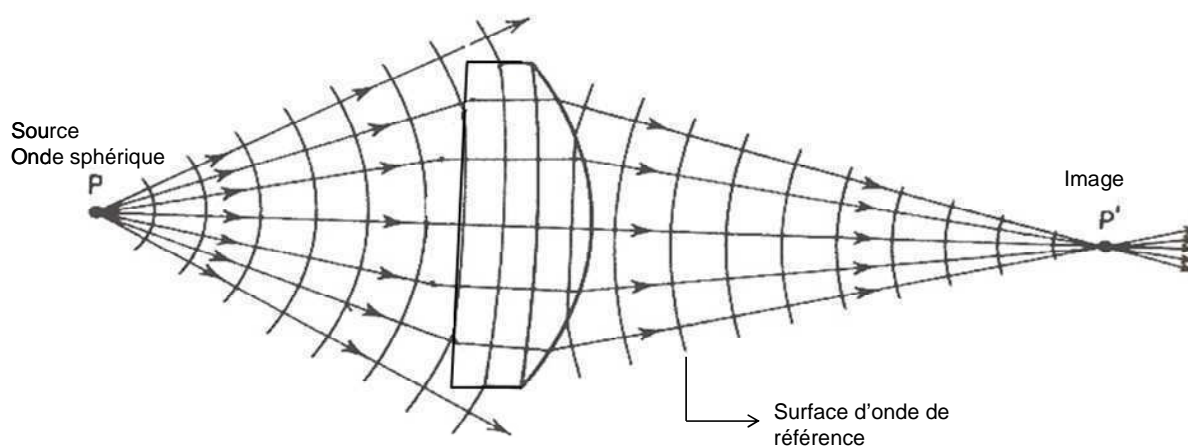


Figure A-1 : Déviation du front d'onde par une lentille plan convexe

Le front d'onde se décrit par un ensemble de points. A travers la lentille, chaque point ne parcourt pas le même chemin optique dans un même intervalle de temps. Dans le cas pris en exemple (Figure A-1), le front d'onde du point source placé sur l'axe optique est retardé par le milieu de la lentille plan convexe, ce qui permet aux faisceaux de converger en sortie du dioptré.

La convergence en un seul point est le résultat d'un système parfait, ce qui n'est pas le cas de la plupart des lentilles. Elle est définie par un diamètre d'ouverture, un indice de réfraction et une épaisseur. Les rayons lumineux ont alors un comportement différent selon leur position d'intersection dans la lentille et l'angle d'inclinaison des faisceaux incidents. Par conséquence, le front d'onde en sortie de la lentille est déformé par rapport à l'onde sphérique de référence établie précédemment. Cet écart, illustré sur la Figure A-2, est la différence de chemin optique qui caractérise l'aberration du système.

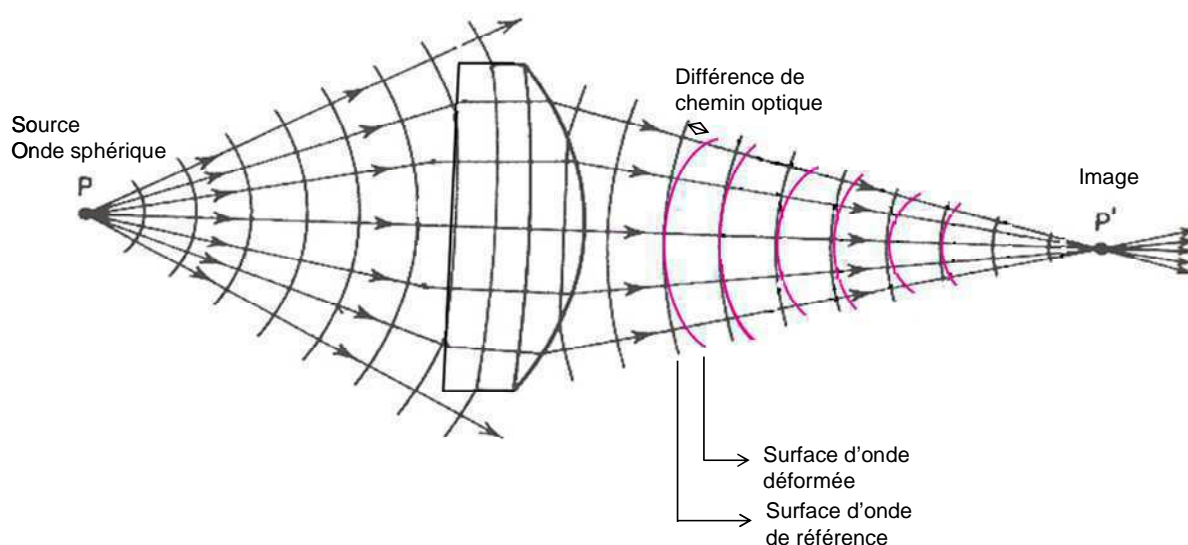


Figure A-2 : Front d'onde réel dévié par une lentille plan convexe avec des aberrations

On peut voir sur le schéma précédent, que la différence de chemin optique augmente lorsque le rayon s'éloigne de l'axe optique. Ce paramètre peut donc se décrire comme l'écart entre les rayons marginaux et ceux passant proche de l'axe optique. Ainsi, pour de faibles angles d'inclinaison, les rayons ont un comportement similaire aux descriptions faites pour un système parfait.

Lorsque le faisceau s'éloigne de l'axe optique, le point de focalisation s'écarte de la position issue d'un système parfait. Le schéma de la Figure A-3 permet d'illustrer cet écart ; le système optique est ici pris comme une « boîte noire ». A sa sortie, le faisceau lumineux réel ne se superpose pas avec le faisceau paraxial représenté en bleu ; cet écart de position crée les aberrations du système.

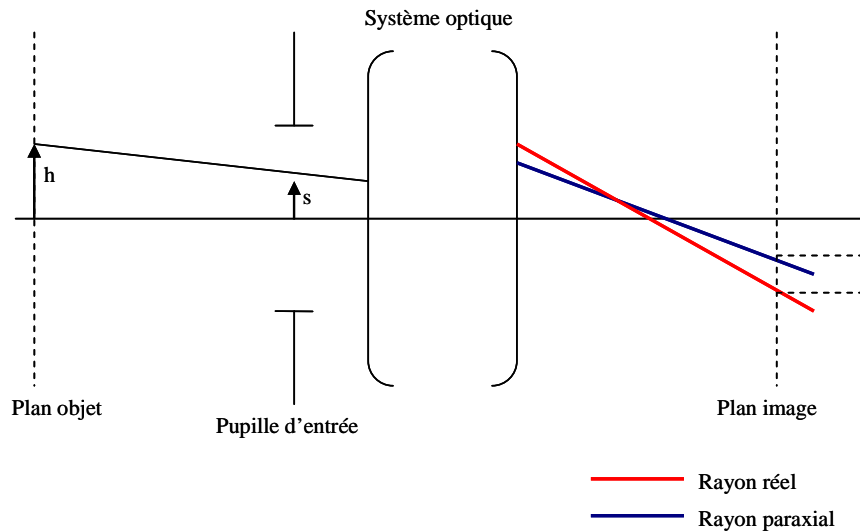


Figure A-3 : Mise en évidence des aberrations dans un système optique

Dans le cas d'un objet, le même phénomène se produit sachant qu'il se décrit par un ensemble de points sources, dont chaque front d'onde subit les aberrations du système optique. La surface image résultante est alors déformée en proportion et ne correspond pas à l'image parfaite de l'objet (Figure A-4).

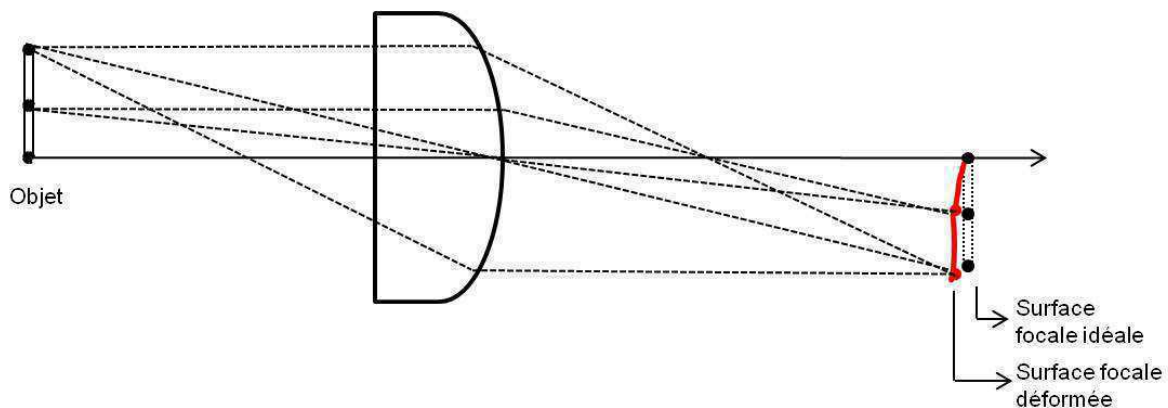


Figure A-4 : Surface image déformée

A.I.1.2 - Fonction d'aberration

Le calcul de la déformation de chaque front d'onde permet de déterminer la position de tous les points objets. Une première approximation consiste à considérer la condition de Gauss ; les relations trigonométriques sont simplifiées et facilite le calcul. Cette approximation n'est réellement justifiée que pour les faisceaux proches de l'axe optique qui forment la région paraxiale.

Pour prendre en compte tout le champ et l'ouverture du système, le calcul est beaucoup plus complexe ; il est alors plus aisé de déterminer la fonction d'aberration W caractérisée par la différence de chemin optique. Cette expression est décrite par l'Équation A-1 pour un système symétrique autour de l'axe optique (Figure A-5).

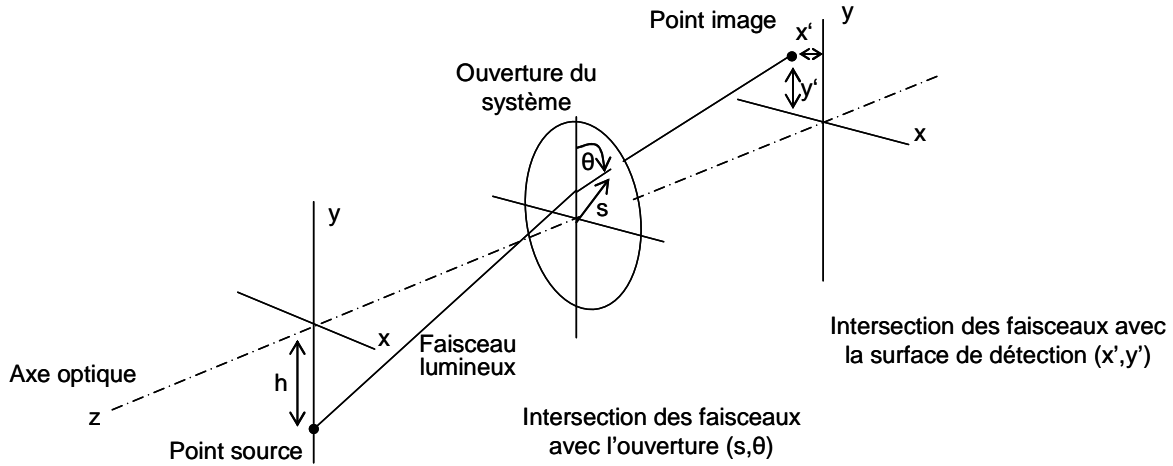


Figure A-5 : Système optique composé d'une interface optique

Les paramètres de l'équation sont la distance, notée h , du point objet par rapport à l'axe optique, ainsi que le couple de coordonnées polaires (s, θ) définissant l'intersection du faisceau dans l'ouverture du système.

$$W = [A_1 s^2 + A_2 s h \cos \theta] + [B_1 s^4 + B_2 s^3 h \cos \theta + B_3 s^2 h^2 \cos^2 \theta + B_4 s^2 h^2 + B_5 s h^3 \cos \theta] + \dots$$

Équation A-1 : Fonction d'aberration

Les positions x' et y' , intersection du faisceau sur le plan image, s'obtiennent en dérivant cette fonction, ce qui permet de définir les deux relations de l'Équation A-2 (W. Smith 2007) :

$$\begin{aligned} y' &= [A_1 s \cos \theta + A_2 h] + [B_1 s^3 \cos \theta + B_2 s^2 h (2 + \cos 2\theta) + (3B_3 + B_4) s h^2 \cos \theta + B_5 h^3] + \dots \\ x' &= [A_1 s \sin \theta] + [B_1 s^3 \sin \theta + B_2 s^2 h \sin 2\theta + (B_3 + B_4) s h^2 \sin \theta] + \dots \end{aligned}$$

Équation A-2 : Equations de position du point image par rapport au point objet

Ces deux équations 1 et 2 sont équivalentes. Le premier crochet correspond à la zone paraxiale : A_1 est le grandissement, A_2 est l'écart de position transversale par rapport à la référence. Les termes d'ordre supérieur sont les aberrations du système, qui peuvent être décrits au 3^{ème}, 5^{ème}, 7^{ème} ordre. Nous nous arrêterons dans cette expression aux termes du troisième ordre (deuxième crochet), sachant que ce niveau de description permet d'appréhender l'essentiel des aberrations influant sur la conception.

Décrites par les coefficients B , elles sont aux nombres de cinq : l'aberration sphérique (B_1), la coma (B_2), l'astigmatisme (B_3), la courbure de champ (B_4) et la distorsion (B_5). Elles sont appelées « aberrations de Seidel », du nom du mathématicien qui les a décrites et classifiées selon leur comportement et leur influence sur la qualité de l'image.

A.I.2 - Descriptions des aberrations

Les aberrations d'un système sont de deux types : les aberrations chromatiques et les aberrations géométriques.

A.I.2.1 - Aberration chromatique

L'aberration chromatique correspond à la dépendance de la distance de focalisation avec la longueur d'onde. En effet, l'indice de réfraction n de la lentille dépend de la longueur d'onde du faisceau lumineux ; c'est le phénomène mis en œuvre dans la dispersion de la lumière par un prisme. Ainsi, les différentes longueurs d'onde constitutives de la lumière ne sont pas réfléchies avec le même angle à la surface de la lentille, et ne focalisent donc pas au même point (Figure A-6). La distance focale varie avec la longueur d'onde selon les équations Équation A-3 (Surrel 1999).

$$\lambda = \frac{\lambda_{vide}}{n}$$

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Avec :

f : la longueur focale

n l'indice du matériau

R_1 et R_2 les rayons de courbure de la lentille

λ : la longueur d'onde

Équation A-3 : Expression de la longueur focale

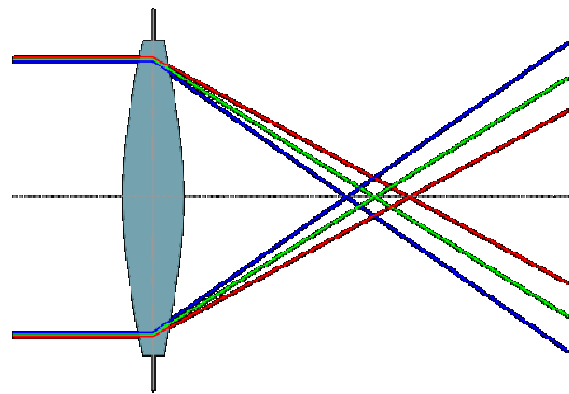


Figure A-6 : Aberration chromatique

A.I.2.2 - Aberrations géométriques

Les aberrations de Seidel sont au nombre de cinq. On distingue les aberrations sphériques, la coma, l'astigmatisme, la courbure de champ et la distorsion. Ces aberrations vont être décrites grâce à un système simple composé d'une seule lentille sphérique.

A.I.2.2.1 - Aberration sphérique

L'aberration sphérique est la différence de convergence des faisceaux parallèles à l'axe optique. Les rayons lumineux situés loin de l'axe convergent en avant du point de focalisation des faisceaux paraxiaux (Figure A-7) ; elle se traduit par une réponse percussionnelle entourée d'un halo.

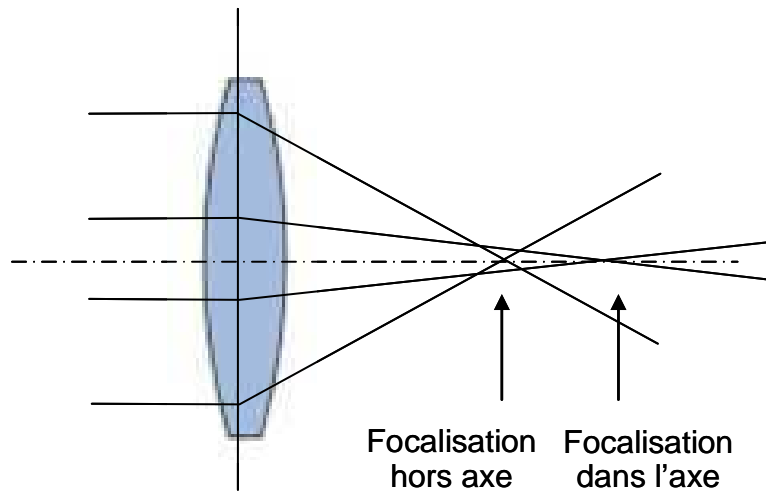


Figure A-7 : Aberration sphérique

On distingue l'aberration longitudinale et transversale selon les faisceaux parallèles ou perpendiculaires à l'axe optique. L'image d'un point source est alors une tache définie comme le « cercle de moindre confusion » et non plus un point. La conséquence sur la qualité image est une diminution du contraste et de la résolution, qui tend à rendre l'image floue. Pour une lentille sphérique simple, on peut démontrer que cette aberration peut se minimiser en utilisant une lentille dont les rayons de courbure sont optimisés. Pour les systèmes travaillant dans l'infrarouge, cette forme est un ménisque.

A.I.2.2.2 - Coma

L'aberration de coma est la déformation du point image en une comète. Elle apparaît pour les rayons issus de la source, inclinés par rapport à l'axe optique (Figure A-8). Cette aberration est une des premières à devoir être corrigée dans une architecture optique ; en effet, du fait de sa dissymétrie par rapport à l'axe optique, elle complexifie grandement la mise au point.

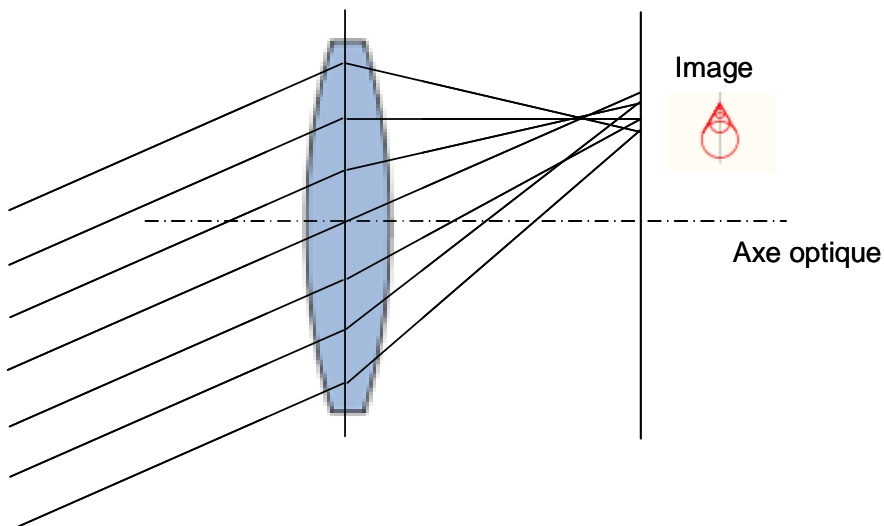


Figure A-8 : Coma

La correction conjointe de l'aberration sphérique et de coma peut être réalisée par une lentille aplanétique ou un aplanat (Kubacki 2005). Cette lentille possède une surface asphérisée, pour corriger l'aberration sphérique et une courbure définie, pour corriger la coma.

A.I.2.2.3 - Astigmatisme

L'astigmatisme est l'aberration qui déforme un point en une tache d'allure elliptique ou en croix, suivant la position du plan d'observation. Cette déformation est due à une différence de points de focalisation des faisceaux plans appartenant à des plans perpendiculaires, issus d'un même point source. La Figure A-9 illustre la focalisation des faisceaux bleu et rouge qui sont perpendiculaires entre eux. Les faisceaux ne convergent plus en un point mais en deux lignes séparées, formant alors un bâtonnet vertical ou horizontal. Ces tracés décrivent les deux plans de focalisation : le plan tangentiel et le plan sagittal. Le plan tangentiel est défini comme le plan qui intercepte le point hors axe de l'objet et qui passe par l'axe optique. On définit le rayon principal qui passe par le centre de la lentille. Le plan sagittal est le plan perpendiculaire à ce plan qui contient ce rayon. L'astigmatisme apparaît lorsque la focalisation sur ces deux plans ne coïncide pas.

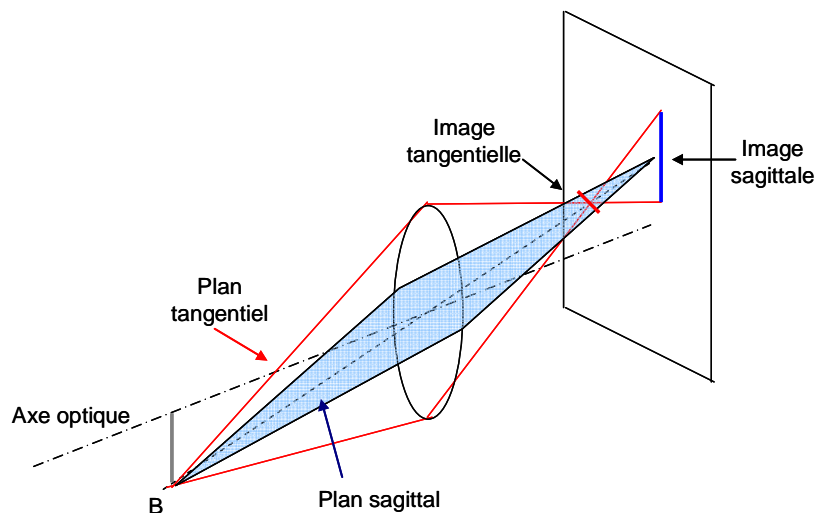


Figure A-9 : L'aberration d'astigmatisme

La meilleure image s'obtient pour un plan compris entre le plan sagittal et tangentiel; l'image est alors le cercle de moindre confusion, et la tache image apparaît comme étant en croix. La correction de cette aberration peut être obtenue par des surfaces asphériques, le système est alors anastigmat. Dans le cas usuel où la pupille est centrée sur la lentille, la courbure du dioptré ne permet pas de supprimer cette aberration.

A.I.2.2.4 - Distorsion

La distorsion est l'aberration qui déforme la périphérie de l'image d'un quadrillage parfait. La Figure A-10 présente soit une déformation en coussinet, soit en barillet. Dans le premier cas, la périphérie présente une concavité dirigée vers le centre ; dans le deuxième cas, l'image présente une convexité dirigée vers le centre. Les points hors axe focalisent bien sur la surface de détection mais à une distance plus importante ou plus proche de l'axe optique. L'image de l'objet a alors une taille différente de celle théoriquement calculée par l'approximation de Gauss. Lorsque le diaphragme est sur la lentille, il n'y a pas de distorsion.

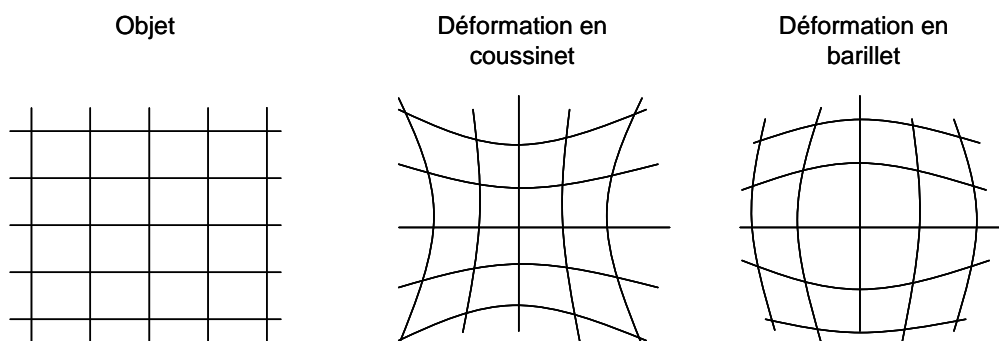


Figure A-10 : La distorsion

A.I.2.2.5 - Aberration de courbure de champ

Enfin, la dernière des aberrations est la courbure de champ. Un système ne possédant que cette aberration donne une image courbe d'un objet plan. Cette aberration fait partie des aberrations géométriques mais est intrinsèquement liée à la volonté du concepteur d'obtenir une surface focale plane, en accord avec le détecteur plan utilisé. L'aberration de courbure est l'écart de cette surface image par rapport au système de détection plan. Dans le cas d'un système à lentille unique, la surface image est concave lorsque la lentille est convergente ; lorsque la lentille est divergente, la surface image est convexe. La courbure C_p de la surface de focalisation s'exprime, pour une lentille mince, en fonction de la position h du point à l'axe optique, l'indice de réfraction n et la longueur focale du système f , selon l'Équation A-4 :

$$C_p = -\frac{h^2}{2nf}$$

Équation A-4 : Courbure de Petzval

D'après l'équation précédente, une solution pour minimiser la courbure consiste à modifier l'indice de réfraction de la lentille. Cependant, l'aberration ne peut être supprimée ainsi ; il est donc nécessaire d'ajouter des lentilles, par exemple, une lentille de champ peut être placée près du plan de mise au point. Cependant, l'ajout de cette lentille va amener de nouvelles aberrations qui, bien que faibles, devront être prises en compte. Les aberrations du 3^{ème} ordre d'une lentille mince dans le plan image sont nulles, mais au 5^{ème} ordre, cette lentille amène de nouvelles aberrations. Plusieurs systèmes de détection privilégient l'introduction d'astigmatisme pour compenser l'aberration de courbure de champ. Ces solutions de correction seront détaillées dans la partie suivante ; il apparaît néanmoins que cette aberration est complexe à corriger.

A.I.2.3 - Diminution des aberrations par les choix de conception

Chaque aberration apporte une déformation à la surface image. Le système optique doit donc être conçu de telle sorte que ces aberrations soient diminuées voire éliminées. Dans cet exemple, nous étudierons un système simple composé d'un diaphragme limitant l'ouverture et une lentille simple. Pour une longueur focale donnée, le concepteur peut utiliser une multitude de lentilles qui varient par les courbures des surfaces et l'indice du matériau. Ces choix et la position de la lentille par rapport au diaphragme permettent de corriger une partie des aberrations.

A.I.2.3.1 - Position du diaphragme et forme de la lentille

Dans le cas où le diaphragme coïncide avec la lentille, l'aberration sphérique et la coma varient de façon importante avec la courbure de la lentille, tandis que l'astigmatisme et l'aberration de courbure sont constantes. Une forme de lentille spécifique permet de supprimer la coma et de minimiser l'aberration sphérique (W. Smith 2007).

Le déplacement du diaphragme modifie les aberrations de courbure de champ, de coma, de distorsion et d'astigmatisme, tandis que l'aberration sphérique est indépendante. Il existe une position, dite naturelle, où la coma est supprimée et la courbure de champ minimisée. Cependant, dans cette position naturelle du diaphragme, la forme de lentille qui diminue l'aberration sphérique est celle qui augmente la courbure de champ.

Par conséquent, la forme de la lentille et la position du diaphragme ne permettent pas de supprimer toutes les aberrations ; la courbure de champ est rarement corrigée de cette façon.

A.I.2.3.2 - Ouverture et champ

Pour cette deuxième analyse, la forme de la lentille est fixée et nous étudions à l'aide de la classification de Seidel, l'influence des paramètres du système (Tableau A-1). Pour chaque aberration présentée précédemment, nous allons déterminer sa variation avec l'ouverture et le champ décrits à la Figure A-5; ce qui permettra notamment de déterminer leur importance dans les caméras. Les variables utilisées sont la hauteur du front d'onde dans l'ouverture notée y , et h la position du point objet qui est relatif à l'angle de vue du système.

Aberration	Ouverture	Champ
Aberration sphérique	y^2	
Coma	y^2	h
Astigmatisme		h^2
Distorsion		h^3
Courbure de champ		h^2

Tableau A-1 : Tableau des dépendances des aberrations selon l'ouverture et l'angle de vue du système

Les aberrations qui dépendent de l'ouverture sont l'aberration sphérique et la coma. Pour ces deux aberrations, la dépendance est au carré. La coma dépend également du champ.

L'astigmatisme, la distorsion et la courbure de champ sont des aberrations de champ. La distorsion a une dépendance au cube avec ce paramètre ; cette aberration est donc particulièrement importante pour l'observation d'objets de grande taille. L'astigmatisme et la courbure de champ varient comme le carré du champ. Ces aberrations sont donc dégradantes pour les systèmes à large champ.

Les systèmes qui font l'objet de ma thèse (miniature et grand angle de vue) sont dégradés par ces deux aberrations. Mes travaux proposent une solution pour supprimer la courbure de champ de la manière la plus simple qui soit, puisqu'il s'agit de ne plus la considérer comme une aberration, en autorisant des surfaces focales courbes.

Ces deux parties se sont focalisées sur la mise en évidence des aberrations optiques au travers de systèmes optiques simples. Chaque aberration apporte une déformation à la surface focale qui doit être minimisée. Pour cela, des éléments optiques sont généralement rajoutés. La

correction des aberrations complexifie donc le système ; l'encombrement du système augmente généralement proportionnellement au nombre d'aberrations à corriger.

La part de chaque aberration varie selon les spécifications du système. Pour les systèmes à large champ, la distorsion, l'astigmatisme et la courbure de champ sont les principales sources de dégradation. La correction de ces aberrations est donc primordiale et s'accompagne traditionnellement d'une augmentation de la complexité du système optique. Nous avons traité dans l'introduction de la tendance à l'élargissement du champ et à la miniaturisation ; or ces deux spécifications vont à l'encontre l'une de l'autre. La partie qui suit va étudier la problématique de la miniaturisation dans les systèmes optiques et notamment l'influence des aberrations.

A.I.3 - Méthodes de miniaturisation

Comme nous avons pu le voir précédemment, la taille du système est principalement liée à la complexité de l'agencement des dioptries pour corriger les aberrations. La diminution de l'encombrement est donc liée aux méthodes de minimisation des aberrations.

Pour les mettre en évidence, nous allons analyser la fonction d'aberration (Équation A-5) correspondant aux aberrations du 3^{ème} ordre :

$$W^{(4)} = [B_1 s^4 + B_2 s^3 h \cos \theta + B_3 s^2 h^2 \cos^2 \theta + B_4 s^2 h^2 + B_5 s h^3 \cos \theta]$$

Équation A-5 : Fonction d'aberration correspondant aux aberrations du 3ème ordre

B_1 correspond à l'aberration sphérique, B_2 : la coma, B_3 : l'astigmatisme, B_4 : la courbure de champ et B_5 : la distorsion.

Considérant que le maximum d'aberration est en périphérie du champ, ces coefficients peuvent être exprimés en fonction des paramètres du système :

- indice de réfraction n
- rayon de courbure de la lentille R
- longueur focale f
- champ ou angle de vue ADV
- nombre d'ouverture N

Dans le cas simplifié où l'ouverture du système est dans le plan de la lentille, le maximum d'aberration s'écrit (de la Barriere, Druart, et al. 2011) suivant l'Équation A-6 :

$$W^{(4)}(n, R, f, ADV, N) = -\frac{1}{2^9} \frac{n(4n-1)}{(n-1)^2(n+2)} \frac{f}{N^4} - \frac{1}{2^7(n+2)} \frac{f^3}{N^4} \left[(n+2)R - \frac{1}{f}(n+1) \right]^2$$

$$+ \frac{n+1}{2^5 n} \frac{ADV}{N^3} R f^3 - \frac{2n+1}{2^6 n} \frac{ADV}{N^3} f^2 - \frac{1}{2^5} \frac{ADV^2}{N^2} f^3 - \frac{n+1}{2^6 n} \frac{ADV^2}{N^2} f^3$$

Équation A-6 : Expression de la fonction d'aberration en fonction des paramètres système

Nous allons distinguer deux techniques de miniaturisation selon les paramètres mis en œuvre :

- n et R qui sont des solutions conservant la structure optique,
- N, f, ADV où l'architecture est modifiée.

A.I.3.1 - Conservation de l'architecture standard

L'indice de réfraction et la courbure sont les paramètres de la lentille utilisée. Cette solution est la voie de correction traditionnelle des aberrations et nous avons vu qu'elle était limitée. En effet, le paragraphe précédent a montré qu'une seule lentille ne permet pas de corriger toutes les aberrations. Il existe néanmoins une forme de lentille, dans le cas où le diaphragme est dans sa position naturelle, qui diminue la distorsion, l'aberration sphérique et annule la coma. Cependant, l'aberration de courbure de champ est maximale.

Cette aberration est considérée comme telle parce qu'on force la surface image à coïncider avec la planéité du détecteur. Il est donc possible de supprimer cette aberration si la géométrie du détecteur est modifiée de telle sorte que la courbure du plan focal soit en accord avec la surface image.

Cette solution est celle choisie par la nature pour les systèmes visuels des vertébrés. Ils possèdent la même architecture optique (monovoie) mais possèdent un système de détection courbe (leur rétine), contrairement aux détecteurs plans des caméras. Au cours du temps, la structure courbe concave a perduré, ce qui constitue la meilleure preuve de son intérêt. Intuitivement, on peut voir que la suppression de cette aberration libère la contrainte de conception optique et peut amener une miniaturisation du système. Les parties suivantes seront consacrées à illustrer le gain apporté par la courbure du plan focal. Le développement technique de la courbure concave du plan focal est l'objet de mes travaux.

Ces systèmes restent néanmoins traditionnels et ne permettent pas une miniaturisation extrême, ni une augmentation importante du champ. Pour diminuer fortement l'encombrement, une réelle rupture dans la conception doit avoir lieu.

A.I.3.2 - Modification de l'architecture

La diminution de la fonction d'aberration est obtenue par :

- l'augmentation du nombre d'ouverture,
- la diminution de la longueur focale,
- la diminution de l'angle de vue.

A.I.3.2.1 - Nombre d'ouverture

L'augmentation du nombre d'ouverture N correspond à un système sans lentille, mais avec une ouverture de faible dimension ϕ à la place de la pupille (Équation A-7). Ces systèmes peuvent être réalisés par une caméra sténopé. Ce système très simple est miniature, mais la résolution angulaire est importante, du fait de l'augmentation du nombre N (Équation A-8). La résolution angulaire se définit comme l'angle minimum entre deux points que le système discerne. La résolution devient « mauvaise » lorsque cet angle augmente, donc lorsque la résolution angulaire augmente.

$$N = \frac{f}{\phi}$$

Équation A-7 : Nombre d'ouverture

$$\text{Résolution angulaire} = \frac{\lambda N}{f}$$

Équation A-8 : Résolution angulaire

Ainsi, la solution de miniaturisation qui consiste à augmenter le nombre d'ouverture N est obtenue au détriment de la résolution. Pour certaines applications, notamment militaire, cette solution suffit. Je reviendrai sur ce système dans la troisième partie de ce chapitre.

A.I.3.2.2 - Distance Focale

Une solution de miniaturisation consiste à réduire la distance focale, donc rapprocher la lentille au plus près du plan focal et ainsi diminuer le volume. Afin de conserver le même système après miniaturisation, le champ et le nombre d'ouverture N doivent être conservés, ce qui nécessite une diminution du diamètre de la lentille (Figure A-11).

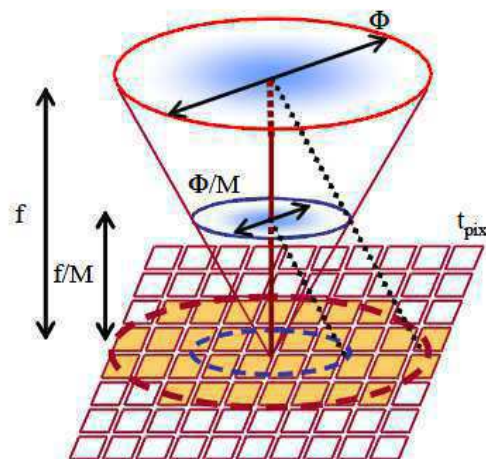


Figure A-11 : Miniaturisation d'un facteur M par la diminution de la longueur focale

Cependant, ce paramètre diminue également la résolution angulaire, d'après l'Équation A-8, et le nombre de points résolus. Cette quantité est définie (Équation A-9) par le rapport au carré entre le champ du système et la résolution angulaire.

$$\text{Nombre points résolus} = \left(\frac{ADV f}{\lambda N} \right)^2$$

Équation A-9 : Nombre de points résolus

Afin de conserver le nombre de points résolus, la surface est pavée de lentilles de faible longueur focale (Figure A-12).

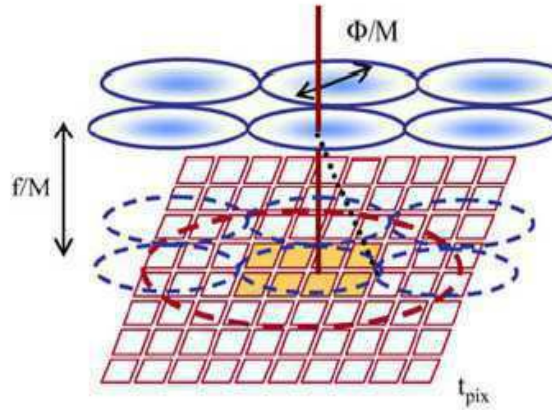


Figure A-12 : Surface pavée de lentilles de faible longueur focale

A.I.3.2.3 - Angle de vue

D'après la fonction d'aberration, une solution consiste à diminuer le champ. La résolution angulaire est dans ce cas constante (Équation A-8) ; cependant le nombre de points résolus sur le détecteur diminue (Équation A-9).

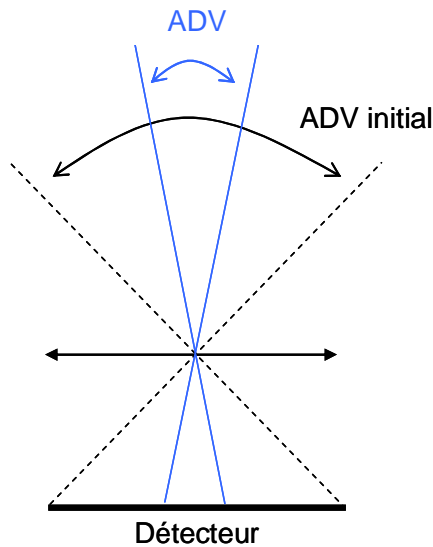


Figure A-13 : Miniaturisation par la diminution du champ

Le champ total est donc divisé en microsystemes optiques (Figure A-13) pavant le détecteur comme dans la Figure A-12. Ainsi le champ de chaque voie est faible et le nombre de points résolus est conservé.

A.I.3.2.4 - Solution de miniaturisation

Les deux techniques de miniaturisation sont obtenues au détriment du nombre de points résolus. Afin de conserver un nombre satisfaisant, l'architecture optique est modifiée pour former une matrice de microsystemes. Cette structure nécessite un post-traitement afin de former une image globale à partir d'images singulières.

Ces méthodes de miniaturisation s'inspirent de la vision multi-pupillaire des invertébrés notamment des insectes. Le système optique se compose d'une matrice de microlentilles et de photorécepteurs dans une organisation hémisphérique. Elle offre ainsi de grands avantages en matière de diminution d'encombrement, d'augmentation du champ. De plus, le traitement approprié des images permettrait d'apporter des fonctionnalités supplémentaires au système (pilotage, navigation). Différents travaux copient cette architecture (Tanida et al. 2001) (Duparre, Dannberg, et al. 2004) ; cependant, la planéité du détecteur ne permet pas un biomimétisme parfait. Comme nous le verrons dans la troisième partie de ce chapitre, ces travaux bénéficieraient de l'usage d'un détecteur courbé. La courbure sera alors forte et convexe.

Courber le plan focal : une solution naturelle

La conception optique de systèmes de détection est un sujet particulièrement complexe. Les aberrations déforment l'image capturée de l'objet réel et dégradent ainsi la qualité optique. La correction des aberrations est traditionnellement obtenue par l'ajout de lentilles, ce qui augmente le volume du système optique. Or la tendance actuelle des systèmes se porte vers une miniaturisation et de nombreuses applications recherchent également une augmentation du champ. L'accord de ces deux spécifications est complexe, étant donné que les systèmes à large champ sont particulièrement sensibles à la distorsion, l'aberration de courbure de champ et l'astigmatisme.

Les systèmes de vision proposés par la nature présentent deux approches de miniaturisation prometteuses. Une voie est en complète rupture avec la conception traditionnelle des caméras; ce sont les architectures multivoies inspirées des yeux d'insectes. Ces systèmes sont extrêmement petits. Mais pour un mimétisme parfait, la rétine doit être fortement courbée en convexe.

La deuxième méthode de miniaturisation consiste à s'inspirer de la structure d'un œil humain, en conservant l'architecture monovoie des caméras traditionnelles. La courbure concave de la rétine permet de supprimer l'aberration de courbure de champ, et par conséquent de simplifier voire de miniaturiser les systèmes optiques. De plus, cette aberration variant avec le carré du champ, sa suppression est bénéfique pour les futurs systèmes de détection alliant grand angle de vue et faible encombrement.

Ces deux solutions seront étudiées au cours du manuscrit. L'objectif de la thèse est la courbure des plans focaux, principalement en concave afin de supprimer l'aberration de courbure de champ. Les avantages d'un tel détecteur seront analysés dans la partie suivante. La dernière partie illustrera les gains des deux configurations de courbure au travers d'applications concrètes.

A.II - Courbure des détecteurs pour supprimer l'aberration de courbure de champ

Cette partie va se focaliser sur la suppression de l'aberration de courbure de champ par la courbure du plan focal. Cette aberration sera mise en évidence dans une première partie. La deuxième partie sera consacrée aux principales méthodes de correction de cette aberration. Et pour finir, nous développerons la solution de correction par la courbure du plan focal et nous en détaillerons les avantages.

A.II.1 - Mise en évidence de l'aberration de courbure de champ

L'aberration de courbure de champ est une aberration géométrique au sens propre du terme. Elle apparaît parce que le système de détection est plan, alors que les faisceaux lumineux du champ visuel ne focalisent pas sur un même plan. Par définition, le détecteur est positionné de manière à focaliser les faisceaux paraxiaux, alors que les rayons lumineux inclinés par rapport à l'axe optique, focalisent plus en avant ou en arrière du plan focal. Cette surface image est une surface courbe appelée surface de Petzval, du nom du scientifique qui a expliqué et corrigé cette aberration (Petzval 1975).

La Figure A-14 illustre cette courbure de champ pour un système ouvert à $N=3$, avec une lentille plan-convexe simple. L'écart de focalisation dans l'axe et hors axe est mis en évidence par les agrandissements de ces zones. Dans l'axe, les faisceaux interfèrent parfaitement sur le plan focal, tandis que dans les zones hors axe, la focalisation est obtenue en avant du plan focal. Sur le détecteur, les faisceaux hors axe ne forment pas un point, mais une tache qui crée l'aberration de courbure de champ.

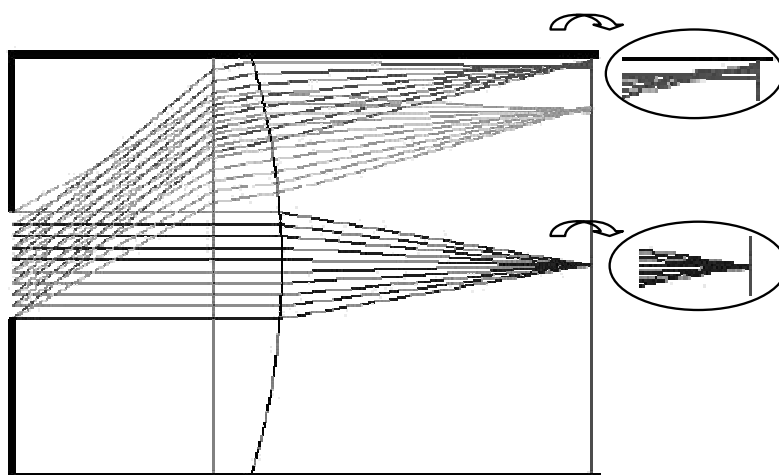


Figure A-14 : Mise en évidence de l'aberration de courbure de champ

Cette aberration peut être mise en évidence au travers de cette architecture optique simple, par un calcul des points de focalisation dans l'axe et hors axe. Ce système, présenté à la Figure A-15, travaille dans l'infrarouge ; ses caractéristiques sont les suivantes : une longueur focale de 9 mm, un nombre d'ouverture de 3, et un champ maximum de 40°. La lentille en silicium est plan convexe ; elle a un rayon de courbure de 21,6 mm, une épaisseur de 2 mm et un indice de réfraction de 3,4.

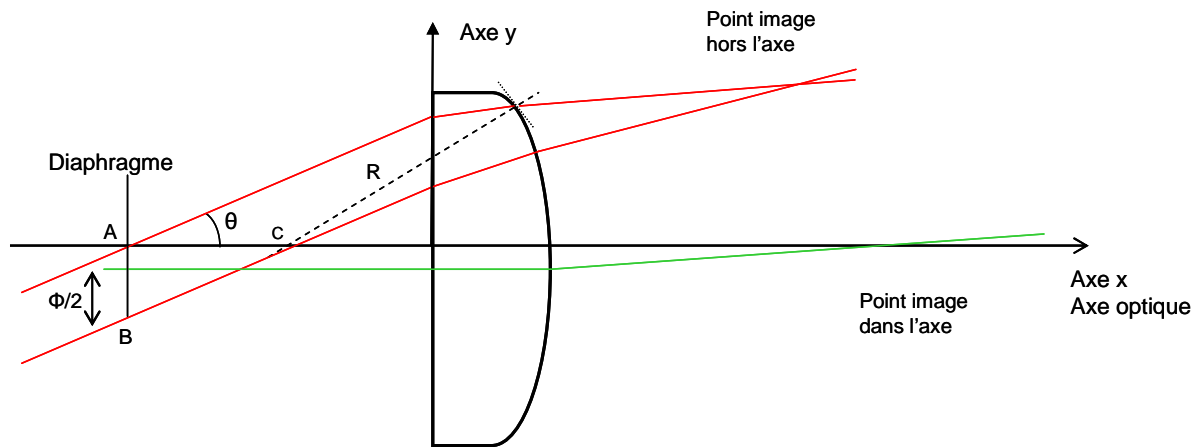


Figure A-15 : Schéma du système optique

Considérons le diaphragme d'ouverture de diamètre ϕ , son rayon est définie par deux points A et B. Le point image dans l'axe est défini par l'intersection de l'axe optique et d'un faisceau parallèle qui est écarté d'une faible distance (faisceau vert). Le point image hors axe est déterminé par l'intersection en sortie de la lentille, des deux rayons lumineux passant par les points A et B, ces faisceaux étant inclinés d'un même angle θ avec l'axe optique.

Un calcul purement géométrique permet de calculer les coordonnées d'intersection des points de focalisation dans l'axe et hors axe, dont l'angle d'inclinaison θ est croissant. Pour l'ouverture maximale du système, lorsque l'inclinaison des faisceaux augmente, le lieu de focalisation s'éloigne de la focalisation paraxiale. Dans l'axe, les rayons se focalisent sur l'axe optique aux coordonnées :

$$X = 10,73 \text{ mm}$$

$$Y = 0 \text{ mm}$$

Pour un rayon hors axe, incliné de 30° , la focalisation se fait au point de coordonnées :

$$X = 10,25 \text{ mm}$$

$$Y = 4,45 \text{ mm}$$

Le graphe ci-dessous (Figure A-16) montre le point de focalisation pour des angles croissants. On voit clairement la courbure du plan focal.

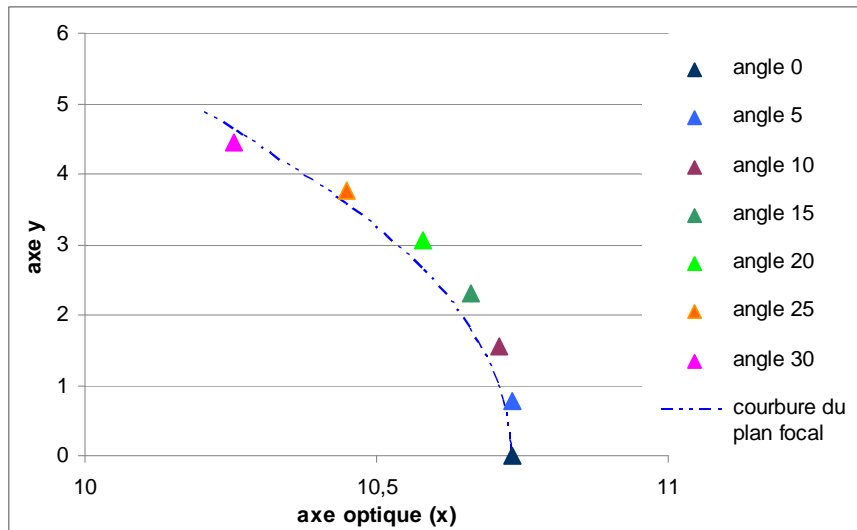


Figure A-16 : Graphe des coordonnées en mm des points de focalisation pour $\phi / 2 = 1,5$ mm

Ces points permettent de définir le cercle de meilleur site, passant au plus près de chaque point ; son rayon est de 23 mm. Il a une valeur voisine du rayon théorique (22,5 mm) calculé par le logiciel de conception Zemax®. L'optimisation est faite sur l'axe par les deux méthodes.

Cette première analyse numérique montre que la focalisation évolue rapidement entre un point proche de l'axe optique et un faisceau incliné. Pour une inclinaison supérieure à 15°, l'écart avec le détecteur plan devient important.

Le même calcul est effectué pour des diaphragmes de diamètres croissants variant de $\phi = 1$ mm à $\phi = 3$ mm. Le rayon formé par les points de focalisation correspondant à ces trois valeurs, est donné dans le tableau ci-dessous.

Diamètre ϕ (mm)	1	2	3
Rayon (mm)	29,5	25,8	23

Tableau A-2 : Rayon de courbure du plan focal pour des diaphragmes de diamètres ϕ croissants

Lorsque le diamètre du diaphragme augmente, le rayon du détecteur diminue c'est-à-dire que la courbure du détecteur est plus importante. Comme la distance focale f est fixée, lorsque ϕ augmente, le nombre d'ouverture N diminue, d'après la relation : $N = \frac{f}{\phi}$

Le rayon de la surface de Petzval augmente donc avec les systèmes très ouverts.

Ce calcul a mis en évidence l'influence de l'angle d'inclinaison des faisceaux (le champ) et du nombre d'ouverture, sur l'aberration de courbure du champ. Ces résultats analytiques corroborent la dépendance avec le champ, exprimée dans l'expression de Seidel (Tableau A-1). Cette aberration est donc d'autant plus importante pour les systèmes d'observations très large champ.

Cette aberration peut être mise en évidence sur des clichés. La Figure A-17 montre trois photos prises avec des objectifs différents ouverts à $N=1,2$. Le premier est peu corrigé de la courbure de champ (Rasmussen 2008). On observe hors axe une perte de contraste qui dégrade la qualité optique par rapport au centre de l'image. Les objectifs Noct-Nikkor 55 mm et 50 mm ne présentent pas cette zone floue hors axe ; ils sont mieux corrigés de cette aberration.



Figure A-17 : Aberration de courbure de champ (Cherokee 2006)

Cette aberration est complexe à corriger puisqu'elle est due à une incompatibilité géométrique entre une surface image courbe et un détecteur plan. La planéité du plan focal est une contrainte que nous subissons. Les technologies de la microélectronique, notamment les procédés de fabrication des détecteurs et des circuits électroniques, sont développés sur des surfaces planes. Le choix du plan paraît effectivement évident pour des raisons de rendement, d'uniformité de lithographie sur le substrat et de simplification des équipements de production. Néanmoins, des travaux se développent pour adapter les procédés de microélectronique à des surfaces non planes (Li et al. 2009) (Radtke et al. 2010) (Snow & Jacobsen 2007). Les résolutions technologiques obtenues et la complexité des procédés ne permettent pas actuellement le transfert de ces équipements dans l'industrie.

Le concepteur optique doit donc élaborer son architecture avec une rétine réellement plane. Il faut alors corriger l'aberration de courbure de champ pour aplanir la surface image sur le détecteur. Selon les instruments, cette correction peut être importante. Nous allons détailler quelques méthodes de correction dans la partie suivante.

A.II.2 - Correction de la courbure de champ : des systèmes traditionnels à la courbure du plan focal

A.II.2.1 - Système à une lentille

Nous avons vu précédemment que la courbure de champ s'écrit dans l'équation de Seidel sous la forme $B_4 s^2 h^2$. Cette formule a été obtenue dans le cas d'un système symétrique avec une seule lentille (Équation A-1). Le coefficient B_4 peut s'écrire en fonction des paramètres du système, à savoir : le champ noté par l'acronyme *ADV* (Angle De Vue), la longueur focale du système f , le nombre d'ouverture N et l'indice de réfraction du milieu n . L'aberration s'écrit alors :

$$\text{Aberration de courbure} \cong ADV^2 \cdot \frac{n+1}{n} \cdot \frac{f^3}{N^2}$$

Équation A-10 : Formule de l'aberration de courbure

Pour un système à une lentille simple, la seule solution pour minimiser l'aberration consiste à augmenter l'indice de réfraction. Dans la gamme spectrale infrarouge, le choix des matériaux est restreint, néanmoins les indices de réfraction sont souvent élevés. Les systèmes de détection dans l'infrarouge sont donc moins sensibles à cette aberration que les systèmes dans le visible. L'influence de l'indice n intervient qu'au premier ordre ; la quantité d'aberrations dépend majoritairement de l'ouverture. Or, la majorité des systèmes infrarouge a un faible nombre d'ouverture. Typiquement, les montages bolomètres sont ouverts à $f/1$, afin de collecter le maximum de lumière. L'indice de réfraction n'est donc pas un facteur clé de la minimisation de cette aberration. L'obtention d'un champ plan n'est alors possible qu'en rajoutant au moins un deuxième élément optique.

A.II.2.2 - Système à plusieurs lentilles

Sans rentrer dans les détails de conception, je vais présenter quelques architectures préconisées pour la correction de l'aberration de courbure de champ. Ces exemples montrent une complexité croissante en fonction de la qualité de la correction souhaitée.

A.II.2.2.1 - Chevalier

Le système proposé par Chevalier (Kingslake 1989) est illustré Figure A-18 c. Cette combinaison est issue de la collaboration entre Louis-Jacques-Mandé Daguerre, Nicéphore Niepce et les opticiens Charles et Vincent Chevalier (Roquencourt 1998). La première version était composée d'un doublet achromatique (Figure A-18 a) que Chevalier retourna afin de diminuer l'aberration de courbure de champ (Figure A-18 b) ; cette solution équipa les daguerréotypes commercialisés par Alphonse Giroux en 1839. Cette solution évolua encore afin d'augmenter le champ. Chevalier modifia le premier élément optique en s'inspirant du ménisque de Wollaston. Ce système permet d'ouvrir à $f/16$ et fut le grand succès, durant tout le XIXe siècle, des objectifs photographiques pour les scènes en extérieur.

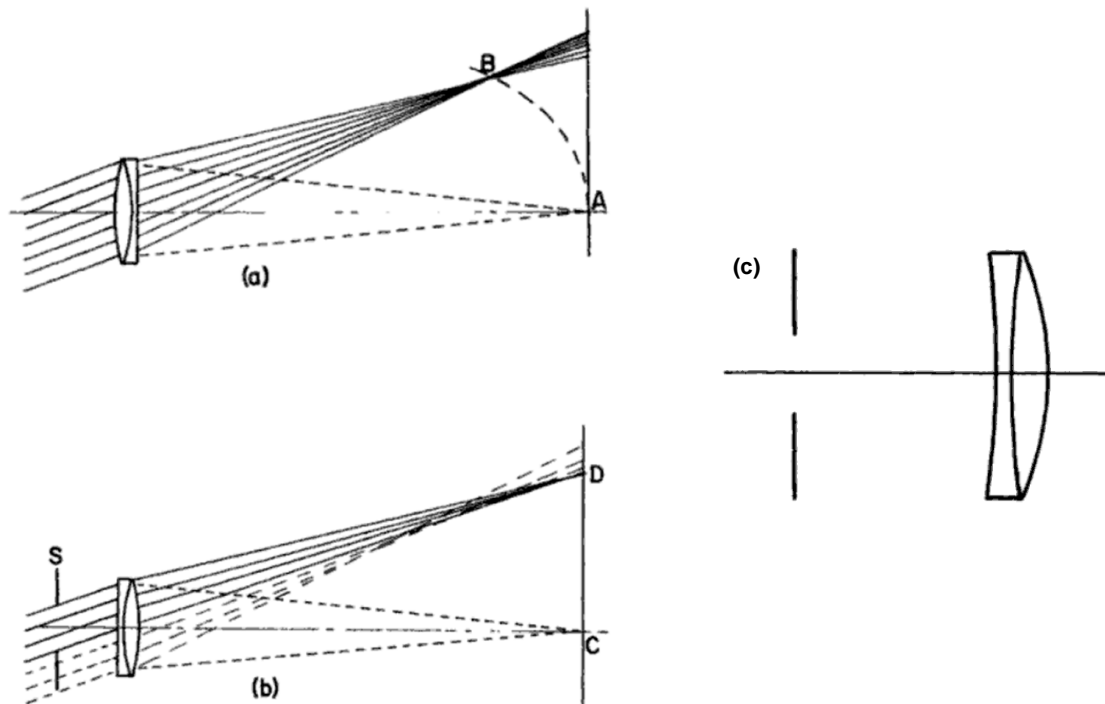


Figure A-18 : Système de correction de la courbure de champ proposé par Chevalier
 a) doublet achromatique non corrigée de la courbure de champ ; b) solution proposée par Chevalier
 vendue dans le daguerréotype ; c) doublet achromatique « French landscape lens »

A.II.2.2.2 - « Sur-correction » de l'astigmatisme

Une deuxième solution consiste à corriger conjointement l'astigmatisme et la courbure de champ. Du fait de l'astigmatisme, la meilleure surface image S d'un objet est le cercle de moindre confusion qui est situé entre les deux surfaces focales tangentielle St et sagittale Ss . Lorsque cette aberration est corrigée, la surface image est confondue avec la surface de Petzval Sp (Figure A-19). Si elle est sur-corrigée, la courbure est inversée et peut compenser la courbure de la surface focale (Balland 2007).

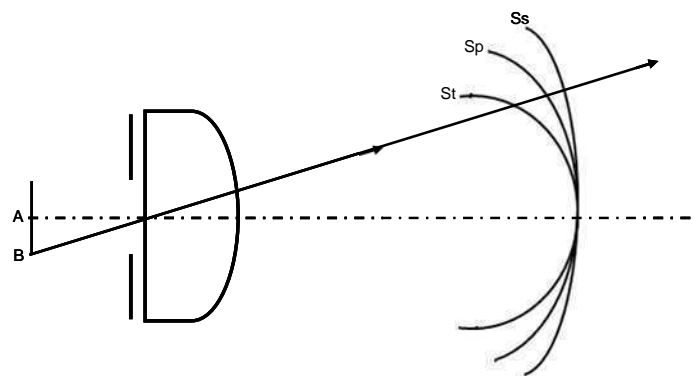


Figure A-19 : Sur correction de l'astigmatisme : Surface de Petzval, sagittale et tangentielle

Cependant cette solution est généralement choisie pour des applications à faibles coûts ; en effet, pour des systèmes de haute qualité et ouverts, cette correction n'est pas suffisante.

A.II.2.2.3 - Objectif de Petzval

Basée sur le principe de sur-correction de l'astigmatisme, la solution utilisée le plus souvent dans les caméras et les microscopes, est l'objectif de Petzval corrigé de l'aberration de champ. En 1840, Joseph Petzval créa le premier objectif photographique réduisant le temps de pose à moins d'une minute. Il est constitué de deux doublets achromatiques et d'un diaphragme qui est placé entre les deux (Figure A-20a). Mais cette architecture n'est pas corrigée de la courbure de champ. Un élément optique de courbure négative doit pour cela être rapporté près du plan focal (Figure A-20b) (W. J. Smith 1966).

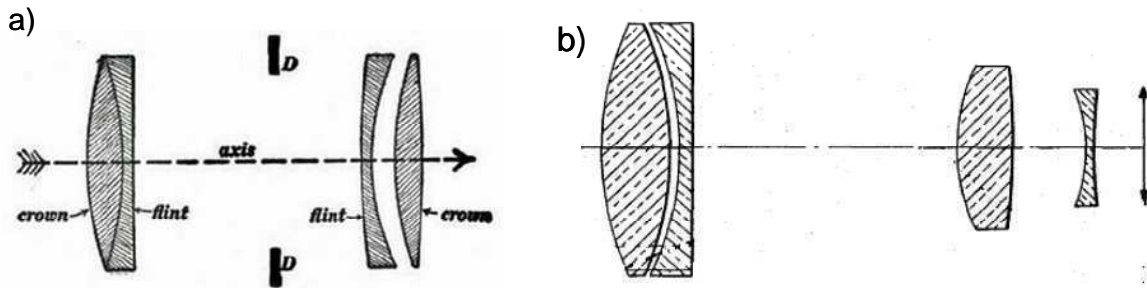


Figure A-20 : Objectif de Petzval : a) original ; b) corrigé de l'aberration de courbure de champ

L'adaptation de cette architecture aux applications actuelles est appelée lentille de projection de Petzval (Figure A-21). Différentes architectures peuvent être conçues en fonction du dioptre utilisé pour aplanir le champ en sortie du dernier biconvexe. La correction peut être réalisée par deux doublets distincts (Schade 1939) ou par un ménisque divergent éloigné du dernier doublet (Schade 1951). Ces deux derniers permettent de mieux corriger l'aberration sphérique.

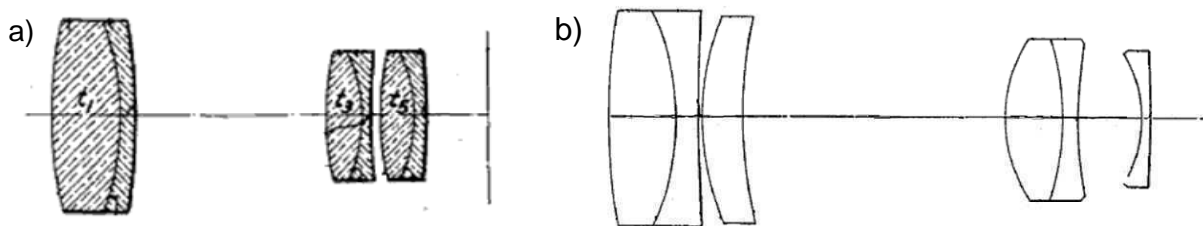


Figure A-21 : Lentilles de projection de Petzval avec a) deux doublets ; b) ménisque divergent

A.II.2.2.4 - Tessar

Un système très utilisé est le Tessar développé par Rudolph en 1902 (Colbère 1999). Il s'agit d'un triplet constitué d'une lentille biconvexe avec un ménisque placé à proximité et un achromat (Figure A-22 a). Cette combinaison permet de corriger l'aberration chromatique et la courbure de Petzval sans rajouter d'aberration sphérique ni de coma. Une évolution de cette architecture est présentée (Figure A-22 b) (Brendel 1958).

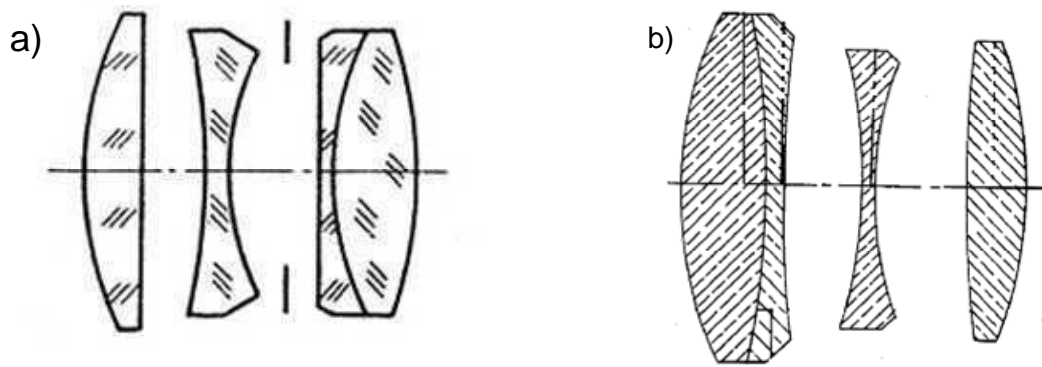


Figure A-22 : Tessar : a) architecture originelle ; b) une des évolutions brevetée

A.II.2.3 - Systèmes à miroirs, correction par lentilles

Dans de nombreux systèmes optiques, les miroirs sont préférés aux lentilles, ce qui est le cas des systèmes avec des pupilles d'entrée de grands diamètres comme les télescopes en astronomie. Compte tenu de leur grande ouverture, ces applications sont particulièrement dégradées par la courbure de champ. Je vais considérer dans cette partie les télescopes composé de miroir qui sont corrigés par l'ajout de lentilles.

Le premier système de correction est proposé par Franck Ross (Texereau 1955) pour les télescopes à miroir parabolique. Cette solution est constituée d'un ménisque avec une première surface fortement convexe et un doublet de lentilles (Figure A-23 a). Les aberrations de coma, de courbure de champ, et en faible partie l'astigmatisme sont supprimées, mais l'aberration sphérique induite est trop importante. Cette solution est peu utilisée.

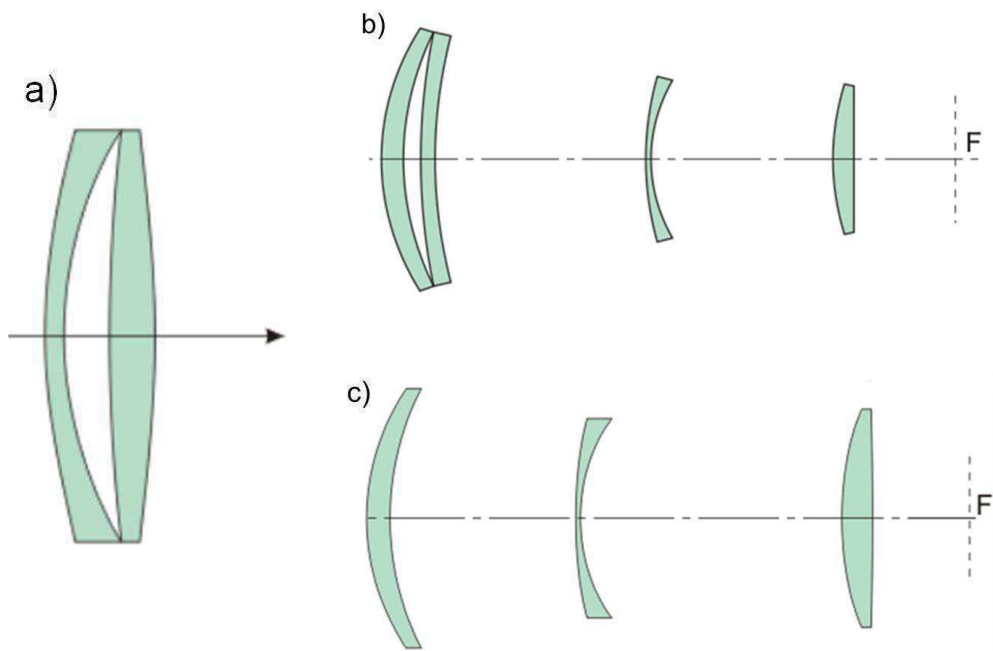


Figure A-23 : Correcteurs de champ a) Ross ; b) Wynne à 4 lentilles et c) à trois lentilles

Pour supprimer toutes les aberrations, il est nécessaire de rajouter des surfaces optiques. Meinel (Meinel 1953) a démontré que la coma et l'astigmatisme peuvent être annulés par trois éléments optiques asphériques, et quatre lentilles permettent de supprimer ces aberrations au 5ème ordre. Suite aux travaux de Ross, Wynne a proposé des architectures à quatre lentilles (Wynne 1967) (Figure A-23 b) puis trois (Wynne 1974) afin de supprimer les quatre aberrations. Différents montages existent selon la qualité de correction recherchée.

Les télescopes à miroir hyperbolique, comme les Ritchey-Chrétien sont dépourvus de coma. Néanmoins, la suppression des aberrations nécessite également trois lentilles. Wynne a proposé différentes architectures (Wynne 1965), (Wynne 1968) (Figure A-23 c) composées de lentilles asphériques.

Pour corriger les aberrations des télescopes, les solutions proposées sont donc complexes (minimum trois lentilles) et volumineuses. Pour illustrer cette partie, le télescope Subaru (IPMU 2011), actuellement en fabrication, possède un correcteur de champ constitué de sept lentilles (Figure A-24) ; le système de Wynne est complété d'un correcteur atmosphérique (Miyazaki et al. 2002).

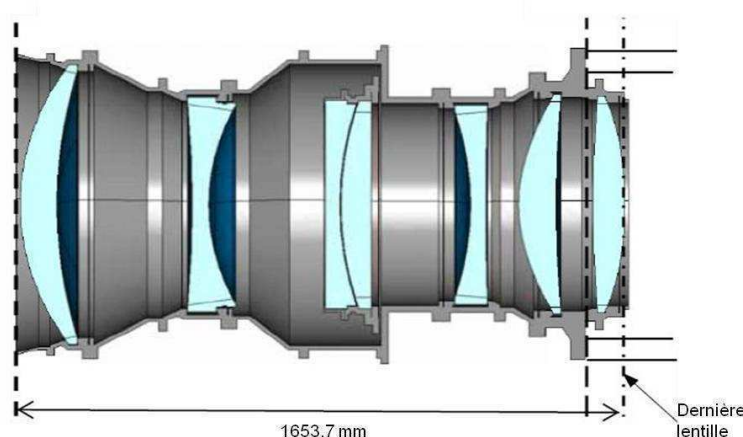


Figure A-24 : Système de correction de champ du télescope Subaru

A.II.2.4 - Systèmes à miroirs

Etudions maintenant des systèmes uniquement constitués de miroirs. L'asphérisation des miroirs permet de supprimer les aberrations sphériques et de coma. Avec uniquement deux miroirs, les télescopes sont limités par l'astigmatisme et la courbure de champ (Wetherell & Rimmer 1972). Néanmoins, il est possible de trouver un agencement des miroirs permettant une correction de ces aberrations (WYNNE 1969).

L'astigmatisme peut se corriger par une distance entre les deux miroirs telle qu'elle soit le double de la distance focale du télescope ; cette condition implique donc un volume important.

Quant à la courbure de champ, une seule architecture permet d'aplanir complètement le champ : c'est la chambre de Wynne. La Figure A-25 illustre cette solution constituée de deux miroirs. L'image se forme derrière le premier miroir ce qui nécessite un diamètre important pour le miroir de renvoi concave ; la taille du système est donc augmentée.

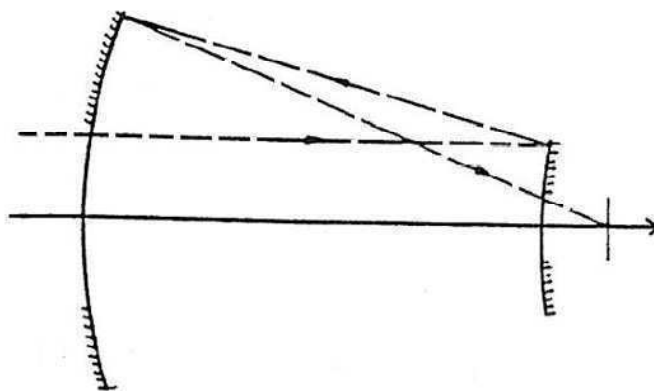


Figure A-25 : Chambre de Wynne

Un système technologiquement réalisable (volume acceptable) et corrigé de toutes les aberrations ne peut pas être obtenu avec deux miroirs ; il faut donc rajouter un dioptré (Geyl). Parmi les combinaisons possibles, seuls deux types permettent de supprimer l'aberration de courbure de champ en diminuant les autres aberrations. Ces deux systèmes sont composés de miroirs d'orientation : concave / convexe / concave ou convexe / concave / concave.

En asphérisant un seul miroir, des solutions de champ plan existent, parfois au détriment du volume. En libérant la contrainte sur les autres miroirs, donc en asphérisant un voire les deux autres, la conception est plus facile et le système peut être plus facilement aplanétique (corrigé des aberrations sphériques, de coma, et d'astigmatisme), anastigmaté et avec un champ plan. La correction parfaite est donc complexe du fait du nombre de miroirs nécessaires et de l'asphérisation de ces éléments.

Toutes les solutions envisagées pour corriger l'aberration de courbure de champ passent nécessairement par l'ajout d'un élément optique. Il est nécessaire de travailler avec, au moins trois dioptrés, pour corriger toutes les aberrations ; cependant, quatre dioptrés représentent un optimum pour aplanir le champ et corriger toutes les aberrations du système. Le volume résultant et les formes généralement asphériques des lentilles, constituent un inconvénient majeur à la simplification des systèmes en vue d'une miniaturisation. Pour ces futures applications, une nouvelle méthode de correction doit être envisagée. Une solution simple consiste à se libérer de la contrainte de planéité du détecteur.

A.II.3 - Les avantages optiques du système avec un plan focal courbé

Avant l'avènement de la technologie numérique, les caméras étaient munies d'un film souple courbé. La projection des images sur un écran cylindrique de taille proportionnelle à celle du grandissement, montrait une image sans aberration. Ces films sphériques étaient également utilisés dans les télescopes de Schmidt pour répondre à la courbure de la surface focale. Le film photographique de détection était maintenu à l'aide de vis ; le vide en face arrière permettait de courber le détecteur et d'obtenir ainsi une très bonne qualité optique sur le large champ observé.

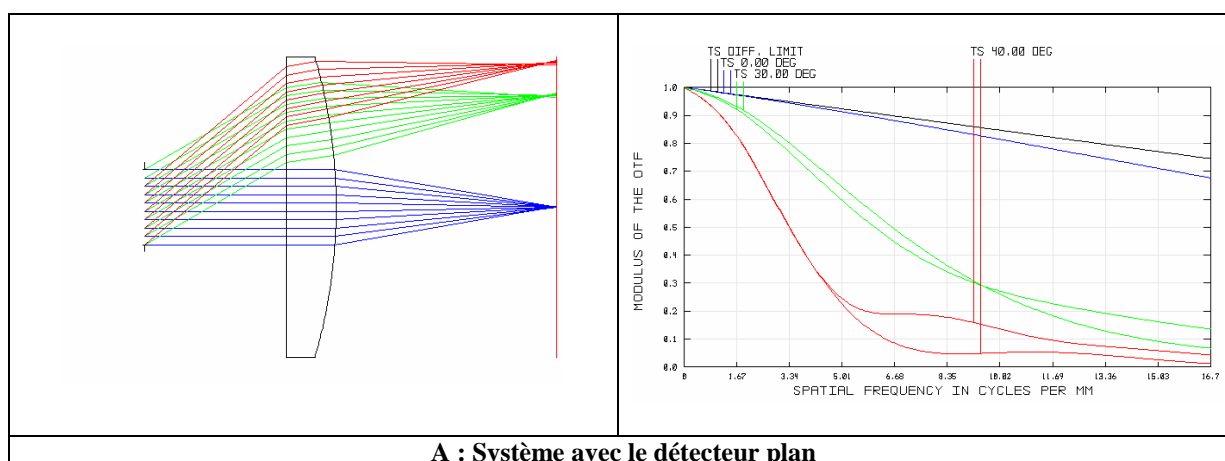
L'évolution du besoin vers des caméras rapides et compactes a permis l'essor du numérique au détriment des films souples. Les capteurs numériques sont plus aisés à manipuler car il n'y a pas de traitement chimique et le post-traitement est facilité. En 1980, le premier appareil photographique électronique proposé par Sony créa l'engouement des fabricants et des

utilisateurs (Larish 1996). La performance des systèmes numériques évolua rapidement et ainsi progressivement, les films souples disparurent au profit des détecteurs à transfert de charge, puis matriciels de type CMOS. Une contrainte supplémentaire s'est rajoutée dans la conception optique : la planéité de ces plans focaux. C'est ainsi que la problématique d'aplanissement du champ intervient et complexifie la conception optique du système, comme nous l'avons vu précédemment. L'idéal serait de cumuler les avantages des films souples (correction de l'aberration de courbure) avec ceux des circuits microélectroniques dans une troisième génération de détecteur.

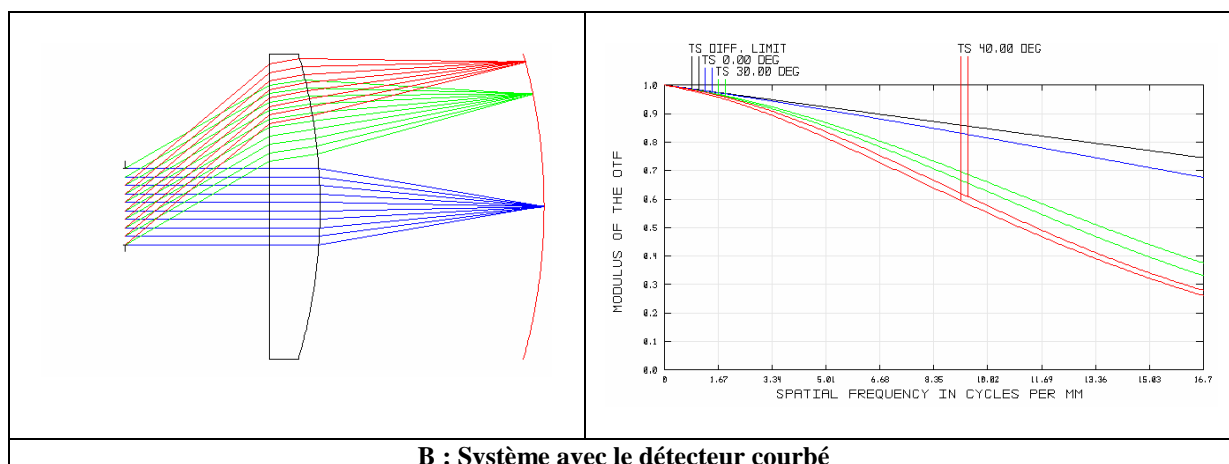
Depuis quelques années, les progrès en microtechnologie ont permis d'immenses avancées pour pallier la planéité des composants. La microélectronique s'appréhende maintenant différemment, et ouvre la voie à de nouvelles applications, comme par exemple les systèmes électroniques souples et flexibles (Rogers & Huang 2009). Avant d'envisager l'aspect technologique dans les prochains chapitres, je vais reprendre ici les avantages de la courbure des détecteurs. On les distinguera en deux catégories : les bénéfices purement optiques et les gains du point de vue de la conception.

A.II.3.1 - Qualité optique : FTM

Le premier avantage est évalué en termes de qualité optique du système. L'objet de cette étude est le système simple à une lentille plan convexe, qui a été étudié dans la première partie. Les systèmes avec un détecteur plan et courbe sont représentés dans la Figure A-26. Le premier montage présente de la courbure de champ, qui est corrigée sur le système courbé. Le rayon de courbure optimisé pour cette architecture a été calculé précédemment à 22,5 mm (A.II.1 - page 21). La qualité optique de ce système est étudiée par la fonction de transfert de modulation (FTM), visualisée dans la deuxième colonne de la Figure A-26. La FTM est le critère le plus utilisé pour juger de la performance d'un système. La caractérisation consiste à évaluer la perte de modulation d'intensité au travers de mires de pas décroissants (ISO 15529 2010).



A : Système avec le détecteur plan



B : Système avec le détecteur courbé
Figure A-26 : Comparaison des systèmes avec un détecteur plan et courbe

Dans le cas du système plan, la FTM des faisceaux hors axe est dégradée par rapport à la réponse impulsionnelle des faisceaux dans l'axe. La qualité optique pour les grandes fréquences spatiales diminue fortement et rapidement : à 40° de champ, la modulation chute en dessous de 0,2 pour une fréquence de 6 cycles/mm. Au contraire, le système avec un détecteur courbé conserve une bonne qualité optique dans tout le champ. Hors axe pour les faisceaux inclinés à 40°, la réponse impulsionnelle est au dessus de 0,25 jusqu'à la fréquence de Nyquist. Le détecteur courbe présente un gain de 20 % à cette fréquence.

La qualité optique est également évaluée par l'uniformité de la réponse impulsionnelle. Elle correspond à l'écart des courbes issues des faisceaux dans l'axe et hors axe. Le graphe du capteur plan montre une forte variation : l'écart de réponse dans l'axe et hors axe varie de 13 % pour la première fréquence spatiale de 1,67 cycles/mm, et présente un maximum d'écart de réponse de 68 %. Au contraire, le système courbé est plus uniforme. L'écart de réponse se creuse progressivement pour atteindre un écart maximum de 40 % à la fréquence de Nyquist du système.

On distingue sur ces courbes FTM les modulations selon les plans tangentiel et sagittal, notées *T* et *S* sur le graphe. Dans la réponse impulsionnelle du détecteur courbe, elles sont similaires contrairement au détecteur plan. Le système courbe peut donc avoir une meilleure correction des autres aberrations du système, notamment l'astigmatisme qui se définit selon ces deux plans. La suppression de l'aberration de courbure de champ par le plan focal courbé permet d'augmenter la qualité optique, du point de vue de la résolution et de l'uniformité.

A.II.3.2 - Qualité optique : éclairage

Un deuxième avantage est lié à l'intensité lumineuse. Cet avantage va être détaillé au travers du calcul de l'éclairage pour les points dans l'axe et hors axe. La Figure A-27 représente une source ponctuelle au point *O* émettant une énergie rayonnante définie, dont l'image est obtenue sur un détecteur plan placé à la distance *OA*. Nous allons considérer une source rayonnant uniformément dans tout l'espace selon la loi de Lambert, c'est-à-dire :

$J_0 = J_0 \cdot \cos(\theta)$ avec J_0 : l'intensité énergétique reçue par la surface normale à l'axe optique.

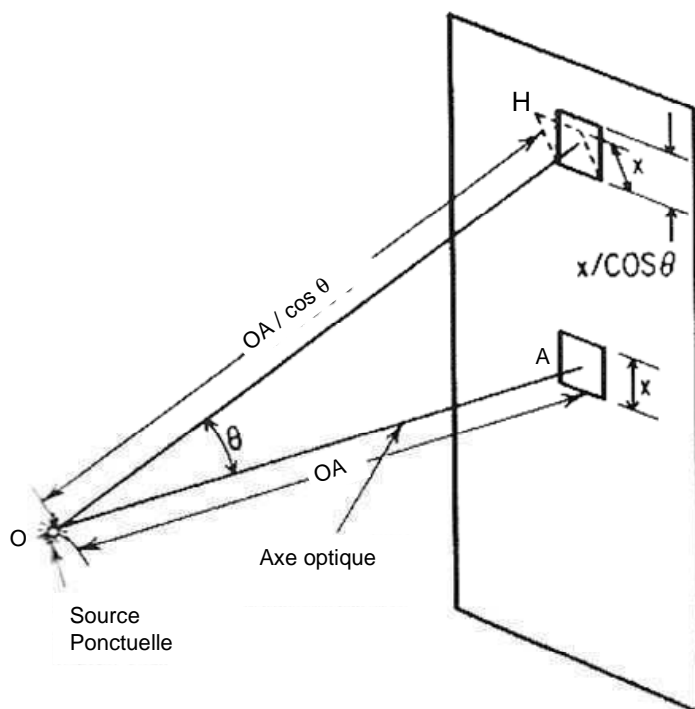


Figure A-27 : Eclairement sur un détecteur plan

L'éclairement du détecteur correspond à l'intensité de la source J , divisée par l'angle solide soutenu par la surface éclairée sur le détecteur $dx dy$. Dans l'axe optique, l'angle solide est la surface divisée par le carré de la distance entre le détecteur et le point source OA . L'intensité lumineuse au point A est alors égale à l'Équation A-11:

$$H_A = \frac{J_0 \cdot dx dy}{OA^2}$$

Équation A-11 : Eclairement au point A dans l'axe

L'intensité hors axe au point H dépend de l'angle d'inclinaison θ par rapport à l'axe optique. Outre la source qui n'est pas parfaite, la dépendance avec l'angle intervient à trois niveaux ; le premier est dû à l'angle solide qui devient au point H : $dx dy \cos \theta$ et le deuxième provient de l'expression de la distance OH qui est $OH = OA / \cos \theta$.

L'éclairement hors axe devient l'Équation A-12 :

$$H_H = \frac{J_0 \cdot \cos(\theta) \cdot dx dy \cdot \cos(\theta) \cos^2(\theta)}{OA^2} = H_A \cdot \cos^4(\theta)$$

Équation A-12 : Eclairement au point H hors axe

L'intensité hors axe décroît rapidement lorsque l'angle augmente ; la dépendance est fonction du cosinus à la puissance quatre. Cette loi sera donc d'autant plus dégradante pour des systèmes larges champs.

Avec le détecteur courbé, le même type de calcul peut être mené (Figure A-28).

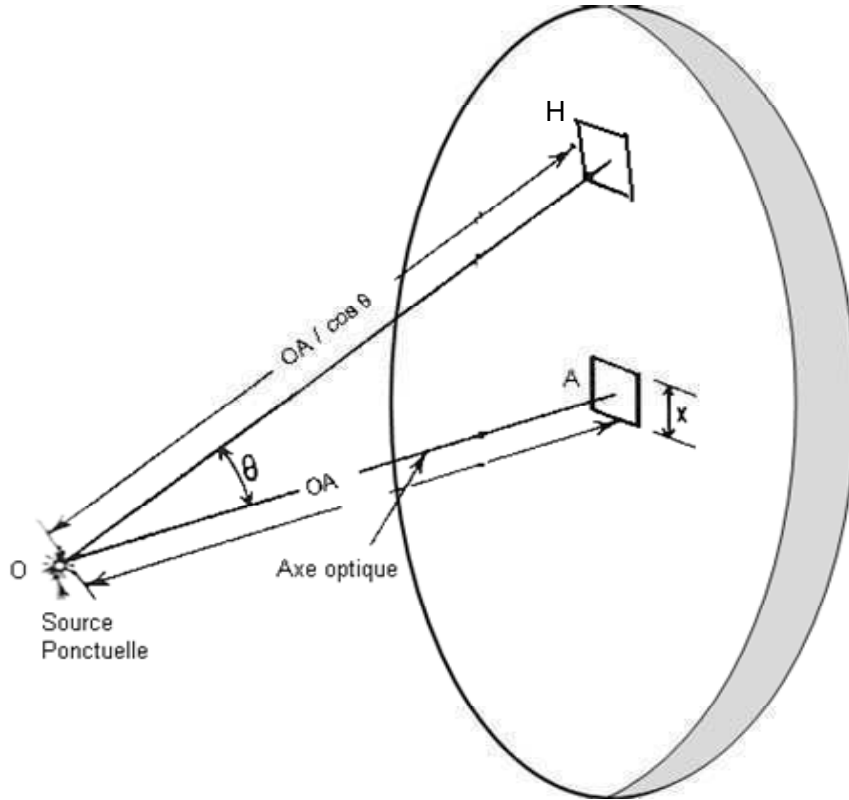


Figure A-28 : Eclairage sur un détecteur courbe

Sur le détecteur courbe, le point hors axe H est à la même distance de la source O que le point A qui se situe sur l'axe optique. La surface unitaire s'exprime sous la même forme pour les points A et H ; en effet, les surfaces unitaires sont normales à la direction de propagation. Les distances OA , OH sont des rayons de courbure et sont donc, par construction, perpendiculaires à la surface. L'angle solide est alors pour A et H égal à $1/OA^2$.

La seule différence dans la formulation de l'éclairage dans l'axe et hors axe provient de la loi de Lambert, qui décrit l'intensité lumineuse de la source pour un faisceau incliné de l'angle θ . La pupille d'entrée est vue sous cet angle qui est la seule contribution angulaire dans la formule. Ainsi l'intensité en H devient l'Équation A-13 :

$$H_H = \frac{J_0 \cdot \cos(\theta) \cdot dx dy}{OA^2} = H_A \cdot \cos(\theta)$$

Équation A-13 : Eclairage au point H hors axe sur une surface courbée

Dans le système courbé, l'intensité est proportionnelle à $\cos(\theta)$, alors que dans le système plan, l'intensité dépend de $\cos^4(\theta)$. L'intensité lumineuse hors axe dans les systèmes traditionnels décroît très rapidement, alors que dans le système courbé, l'intensité hors axe est encore très correcte. Le Tableau A-3 illustre ce gain par le calcul du rapport d'intensité entre les faisceaux hors axe et dans l'axe, sur des systèmes faibles champs (20° à 30°) et larges champs (45° à 60°).

	Rapport d'intensité hors axe / dans l'axe	Angle 20°	Angle 30°	Angle 45°	Angle 60°
Détecteur plan	$= \cos^4(\theta)$	0,77	0,56	0,25	0,06
Détecteur courbé	$= \cos(\theta)$	0,94	0,87	0,71	0,5

Tableau A-3 : Rapport d'intensité entre les faisceaux hors axe et dans l'axe ; Comparaison pour des faisceaux inclinés de 20° (système faible champ) à 60° (système large champ)

Pour des systèmes faibles champs (inférieur à 20°), l'écart est de 17 % entre les deux systèmes. Lorsque le champ augmente, cet écart augmente de 44 %. Pour un angle de 60°, la perte d'intensité hors axe pour le détecteur plan est importante : seul 6 % de l'intensité dans l'axe est récupéré, alors que pour le détecteur courbe ce rapport s'élève à 50 %.

Avantages optiques de la courbure du plan focal

La courbure du plan focal amène deux avantages. Dans un premier temps, l'intensité lumineuse hors axe est bien moins dégradée ; la loi du « $\cos^4 \theta$ » est particulièrement dégradante avec le champ. Outre le gain en intensité hors axe, cet avantage apporte une meilleure homogénéité de l'éclairement sur la surface du plan focal. En effet, pour des systèmes dédiés à la métrologie, la variabilité de l'éclairement sur le détecteur est une difficulté. Par la courbure du plan focal, la performance mesurée n'est plus dépendante de la position sur la matrice. De plus, l'évolution actuelle montre une augmentation de la taille des détecteurs. Ainsi, l'éclairement et l'homogénéité seront des contraintes importantes pour ces systèmes. Pour répondre à ces futures applications, la courbure du détecteur apparaît comme une réponse simple à cette problématique.

La courbure du détecteur n'est pas uniquement un facteur de qualité optique ; elle facilite également la conception du système.

A.II.3.3 - Conception optique

Nous avons vu que le nombre de surfaces optiques nécessaire augmente pratiquement linéairement avec le nombre d'aberrations à corriger ; il faut au moins quatre dioptries pour avoir un système aplanétique, anastigmat et à champ plan. En supprimant une aberration par la courbure du détecteur, un degré de liberté est gagné sur la conception. L'architecture optique peut être simplifiée ou miniaturisée. La simplification consiste à s'affranchir des lentilles complexes comme les asphériques au profit de lentilles sphériques. La miniaturisation est obtenue par la suppression de lentilles dans le système optique.

A.II.3.3.1 - Simplification

Dans certaines conceptions optiques, lorsque le nombre de lentilles est faible, la suppression d'une aberration ne permet pas d'enlever des surfaces optiques au système. En effet, une lentille ne correspond pas à la correction d'une seule aberration mais participe à corriger l'ensemble des dégradations d'une image ; leur choix en est d'autant plus complexe.

Ainsi, la courbure du plan focal permet d'alléger la contrainte sur l'architecture optique ; l'effort de conception peut se reporter sur la correction des autres aberrations afin d'obtenir une meilleure qualité optique finale. Si le nombre de lentilles ne peut pas être diminué, leur type peut néanmoins être modifié. Beaucoup de systèmes utilisent des lentilles asphériques ; elles sont usinées spécialement pour répondre aux spécifications de l'architecture. Avec un seul axe de rotation, elles sont complexes à fabriquer et nécessitent des corrections progressives lors de l'usinage. Le choix des lentilles dans un système conditionne le temps de conception, le délai et le prix d'achat des approvisionnements. En courbant le détecteur, le choix du type de lentilles est allégé. Et pour certaines applications, le gain économique obtenu peut être un avantage conséquent. Par exemple, les instruments d'astronomie gagneraient en temps d'optimisation et de montage, l'intégration serait plus aisée et le coût global diminué.

A.II.3.3.2 - Miniaturisation

Idéalement, la suppression d'une ou plusieurs lentille(s) est un avantage important apporté par la courbure du détecteur. Ce cas apparaît généralement lorsque les systèmes sont volumineux comme dans les instruments d'astronomie. Dans ces conceptions, le degré de liberté gagné grâce à la courbure est un facteur important qui modifie considérablement l'architecture. Le nombre de lentilles diminue et le gain en volume n'est pas négligeable sur des systèmes de cette taille. Du point de vue optique, le rayonnement lumineux traverse moins d'interfaces air/verre, la transmission du signal est meilleure pour un rapport signal sur bruit augmenté et le montage est facilité (simplicité, tolérance, maintenance). Tous ces avantages permettent d'obtenir une meilleure résolution, et également un gain en poids qui en font des objets potentiellement spatialisables. Ces avantages seront mis en lumière sur les deux instruments d'astronomie qui seront étudiés dans la partie suivante. A l'extrême, la courbure du détecteur donne accès à des systèmes minimalistes à une seule lentille, comme nous le verrons au quatrième chapitre.

La courbure : optimisation, simplification et miniaturisation

La courbure du détecteur a des avantages à la fois en termes de qualité optique et en conception. Le gain principal est la correction de l'aberration de courbure de champ. Le fait de supprimer cette aberration permet de gagner en résolution, en intensité et en homogénéité d'éclairage.

Le gain en temps de conception est également important. Les solutions traditionnelles pour aplanir la surface image sont complexes et nécessitent l'ajout d'éléments optiques ; un minimum de trois lentilles est nécessaire pour corriger toutes les aberrations. Le montage optique peut être simplifié, voire miniaturisé, avec le plan focal courbé. La conception est plus facilement optimisée et l'approvisionnement ainsi que le montage optique sont plus rapides. De par la complexité d'une architecture optique, la courbure du détecteur offre un degré de liberté nouveau sur la conception.

Afin d'illustrer ces explications théoriques, nous allons prendre pour exemple dans le paragraphe suivant des systèmes de détection fonctionnels. Trois domaines d'application sont étudiés : l'analyse spectrale, l'astronomie et les applications militaires. La courbure du plan

focal concerne des applications dans chacun de ces domaines. Le gain apporté par la courbure du détecteur sera étudié par rapport au système initial avec un détecteur plan.

A.III - Applications des détecteurs courbés

Les avantages théoriques de la courbure ont été présentés dans le paragraphe précédent. Nous avons pu évaluer les avantages optiques obtenus que ce soit par la suppression des aberrations, l'uniformité de l'intensité lumineuse ou le gain en résolution. Ces caractéristiques optiques présentent également des bénéfices du point de vue du système, que j'ai pu vérifier au travers d'applications réelles qui font l'objet de cette partie.

J'ai eu effectivement la possibilité de présenter mon sujet de recherche lors de conférences dans le domaine militaire et en astronomie, au cours desquelles j'ai pu mesurer l'intérêt des concepteurs optiques et des systémiers pour l'accès à cette nouvelle variable de conception. Ces discussions ont été poursuivies dans le cadre de multiples échanges présentés ici, et les résultats notamment dans l'astronomie, sont le fruit de ces collaborations. Les applications militaires sont issues, quant à elles, de la collaboration avec l'ONERA dans le cadre du projet TEMOIN financé par la Direction Générale de l'Armement (DGA). Trois domaines d'application seront donc présentés, dans lesquels le détecteur courbe apporte des avantages en qualité optique et miniaturisation. Dans une première partie, nous traiterons des applications dans l'analyse spectrale, ensuite nous détaillerons les applications en astronomie pour finir avec les applications militaires.

A.III.1 - Applications dans l'analyse spectrale

La première illustration des détecteurs courbes va porter sur les applications d'analyse spectrale, et plus particulièrement sur la spectrométrie intégrée. La quantité d'informations transmises par la lumière est phénoménale et la spectrométrie en est l'outil fondamental d'analyse. Cette science adresse une large gamme de domaines d'application : biomédical, chimie, environnement, astrophysique...

Différents systèmes existent, qui ont traversé le temps et évolué selon les applications. La première technique de spectrométrie était le prisme de Newton ; cette première expérience en 1666 permit à Sir Isaac Newton de décomposer la lumière blanche en utilisant un prisme et la lumière du soleil (Newton 1993). Les instruments ont par la suite évolué, mais restent généralement volumineux. Depuis une trentaine d'années, la course à la miniaturisation a mené à de nouveaux systèmes. Cette miniaturisation est obtenue par une diminution du nombre d'optiques ; ainsi un même élément cumule plusieurs fonctions comme par exemple, la dispersion et l'imagerie.

Cette recherche de miniaturisation ouvre la voie à de nombreuses applications nouvelles, (Bacon et al. 2004) industrielles (analyse chimiques, biologiques, contrôle non destructif) ou environnementales. Par exemple, l'analyse du pH au fond des mers nécessite l'encapsulation du spectromètre dans des submersibles. Il apparaît clairement que les spectromètres miniatures ouvrent un marché plus vaste que ceux de laboratoire. Avec cet essor, le besoin s'est tourné vers des spectromètres légers, compacts et faibles coûts, sans négliger la

conservation de la bande spectrale et de la performance optique. Parmi les nouvelles architectures alliant compacité et résolution (R.F. Wolffenbuttel 2004), je vais me focaliser sur trois spectromètres qui bénéficieraient de la courbure du plan focal.

Le premier est un spectromètre très compact composé d'un guide d'onde, d'un élément dispersif et d'un détecteur. La lumière qui entre dans le guide d'onde est diffractée par le réseau, qui est constitué de rainures périodiques. Le spectre est collecté sur un dispositif à transfert de charge qui est à la normale du guide dans une première version (K. Chaganti et al. 2006), et incliné par rapport au guide de 53° dans une deuxième version (Ivan Avrutsky et al. 2006). La focalisation sur le détecteur est obtenue dans le premier système par une lentille, et dans le deuxième cas par un prisme de milieu d'indice 1,50. La résolution est sub-nanométrique. Les Figure A-29 et Figure A-30 montrent ces deux systèmes.

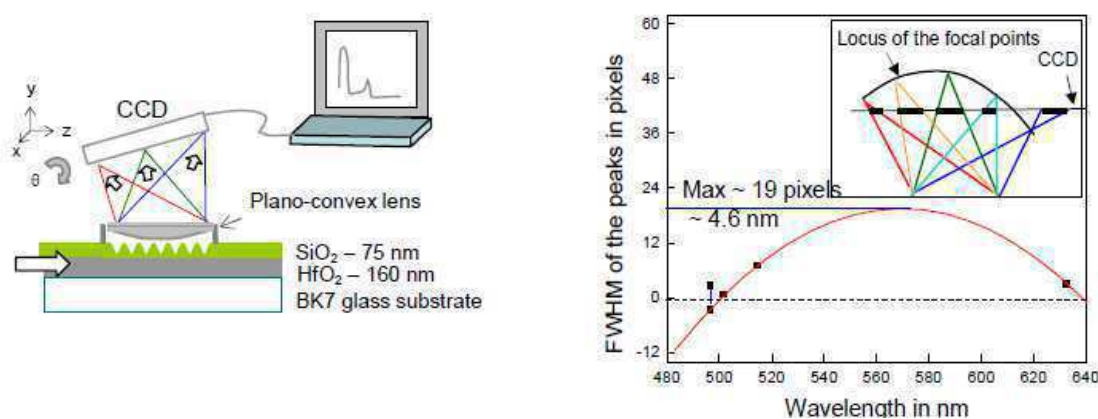


Figure A-29 : Spectromètre intégré Chaganti et al

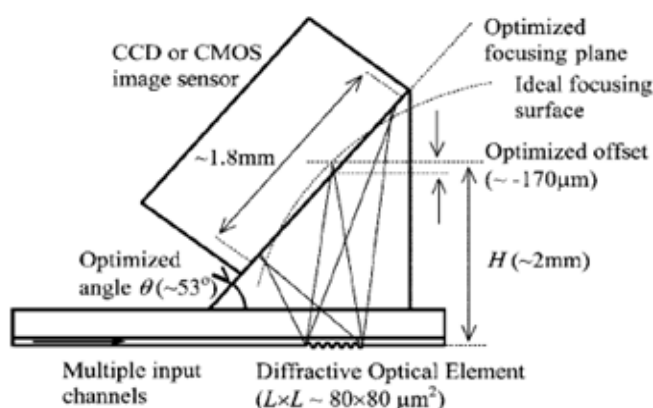


Figure A-30 : Spectromètre intégré Avrutsky et al

Ces figures illustrent parfaitement la difficulté optique de ce type de système. Le maximum d'intensité du pic mesuré à chaque longueur d'onde forme une surface courbée alors que le détecteur est plan. Ce système intégré présente donc de l'aberration de courbure de champ qui ne peut pas être corrigé en rajoutant des lentilles. La seule lentille dans le système de Chaganti et al, ne permet pas de corriger cette aberration. La résolution est alors dégradée. La solution idéale pour ce type de système est la courbure cylindrique du plan focal, comme le montre Avrutsky et al sur le montage optique. Le rayon de courbure dans ce cas est de 1,6 mm.

Ce phénomène de courbure de champ est analysé dans les travaux de Sander et al (Sander & Müller 2001) sur les spectromètres à réseau. Ils démontrent que les maxima d'intensité diffractés focalisent sur le détecteur en formant une courbe et non une droite (Figure A-31).

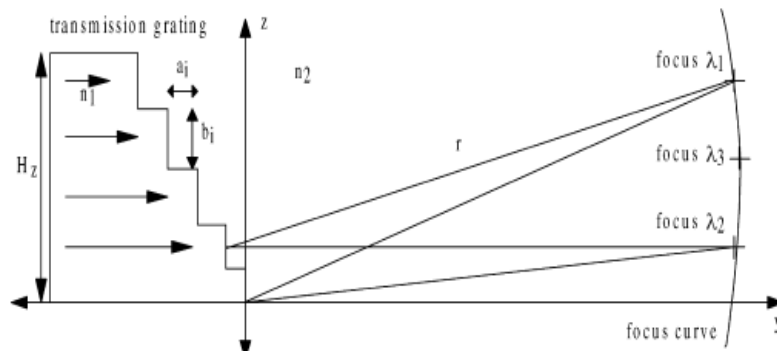


Figure A-31 : Focalisation des pics d'intensité par un réseau

Actuellement, pour diminuer les aberrations d'un réseau, il faut, soit diminuer l'ouverture du spectromètre, soit corriger les aberrations avec un autre réseau plan (Semen Grabarnik et al. 2008). Une solution alternative consiste à utiliser des miroirs concaves (S. Grabarnik et al. 2009) ; le miroir permet de conserver une grande ouverture et de diminuer les aberrations. Brunner et al (Brunner et al. 2008) propose de cumuler la fonction dispersive et diffractive sur cette même surface concave (Figure A-32).

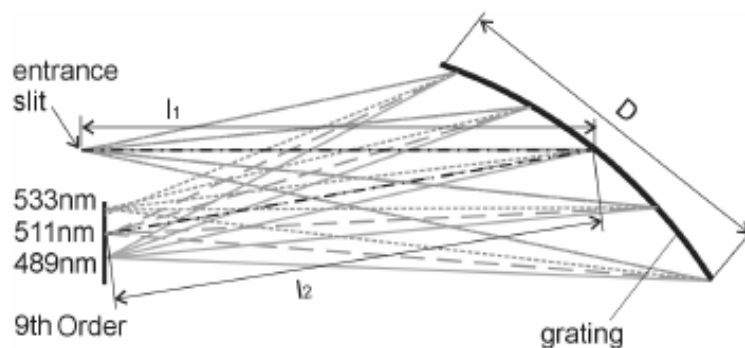


Figure A-32 : Système de Brunner et al réseau concave

Des réseaux courbes peuvent être envisagés grâce aux progrès dans les techniques d'holographie, d'électronique souple ou de gravure laser. Néanmoins, elles ne sont pas encore totalement fiables, répétables et de résolution suffisante pour une exploitation industrielle.

Ces architectures à réseau concave rappellent le spectromètre proposé par Rowland. Ce système, également appelé sphère de Rowland, est présenté à la figure ci-dessous.

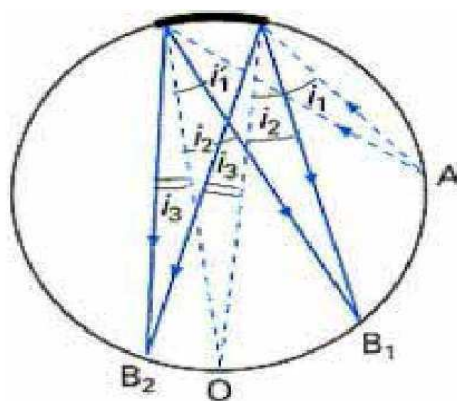


Figure A-33 : Sphère de Rowland

L'intérêt de ce spectromètre est de réunir sur une sphère les fonctions de diffraction et de détection. Il est composé d'un réseau gravé sur la surface courbée et les spectres se focalisent sur la surface diamétralement opposée à cet élément diffractif. Pour utiliser pleinement ce concept, le détecteur doit être courbé ce qui actuellement n'est pas le cas ; les solutions basées sur ce principe doivent aplanir la surface image (Janz et al. 2004) ; les techniques d'analyse X utilisent ce type de système. Le rayon de la sphère est typiquement de 140 mm à 210 mm (CHARLOT, et al. 2007). Le montage de Debye Scherrer, notamment, utilise un film cylindrique entouré autour de l'axe, que les photons X impressionnent (BROLL 1996). Cependant, la majorité des diffractomètres utilise des compteurs de photons, qui parcourent le cercle de focalisation selon l'angle de diffraction. Le rayonnement X ionise un gaz créant des paires ion/électron (compteur Geiger Muller) ou excite un semi-conducteur créant des paires électrons/trous en proportion.

Ainsi, étant donné que la surface focale est courbée, ces spectromètres intégrés sont limités par la planéité des détecteurs. L'aberration résultante dégrade la résolution du système. Chaganti et al, ont analysé leur système selon trois distances focales différentes. La résolution spectrale est indiquée dans le tableau ci-dessous, pour les gammes de longueur d'onde mesurées.

Système	Distance Focale	Volume du système	Résolution $\Delta\lambda$	Gamme spectrale
1	14 cm	16x4x4 cm ³	0,2 nm	514,5 nm - 632,8 nm
2	2 cm	2,5x0,8x0,8 cm ³	0,2 nm	632,8 nm - 640 nm
3	1 cm	1,2x0,4x0,4 cm ³	0,3 nm	632,8 nm - 640 nm
4	1 cm	1,2x0,4x0,4 cm ³	0,51 nm	514,5 nm - 632,8 nm

Tableau A-4 : Influence de la miniaturisation sur la résolution (K. Chaganti et al. 2006)

Lorsque la distance focale du système est réduite, le volume global diminue ; on observe que pour une même gamme de longueur d'onde (système 1 et 4), le système a une moins bonne résolution. Pour un système miniature (système 3 et 4), la résolution est également dégradée lorsque la bande spectrale est élargie. Ces résultats illustrent quantitativement la perte de résolution et la diminution de la bande spectrale du fait des aberrations, et notamment de la courbure de champ. L'enjeu des travaux de recherche est de miniaturiser tout en conservant à la fois la résolution et le domaine spectral.

Courbure & Analyse spectrale

Ces trois exemples montrent l'intérêt de courber le détecteur afin qu'il corresponde aux loci de focalisation des spectres. Typiquement, les détecteurs des spectromètres sont des barrettes de longueur inférieure à 1 cm, et généralement composés d'une à deux colonnes utiles. La courbure recherchée est donc plus exactement une courbure cylindrique, et d'après ces exemples, une faible courbure permet d'améliorer sensiblement ces systèmes.

Intuitivement, on sent bien que la courbure cylindrique est plus aisée que la courbure sphérique, et plus le rayon est important (faible courbure), plus il est facile de courber. Ces remarques technologiques seront détaillées dans le chapitre suivant.

En conclusion de cette partie, il apparaît que les spectromètres intégrés seraient améliorés par la courbure du détecteur. Les premières études montrent un intérêt pour la courbure cylindrique et à fort rayon. Ainsi, l'aberration de courbure de champ est supprimée, ce qui permet d'obtenir une meilleure résolution spectrale et de miniaturiser ces systèmes sans dégrader les paramètres importants (sensibilité et bande spectrale). Le domaine de l'analyse spectrale représente donc une première application des détecteurs courbes.

A.III.2 - Applications d'astronomie

En astronomie, la courbure de détecteurs présente un potentiel énorme pour les instruments futurs. Cette courbure n'est pas une nouveauté puisque le télescope de Schmidt, inventé en 1930, a une surface focale sphérique (Müürsepp 1968). Lorsque l'astronomie utilisait des films souples, le système de détection pouvait suivre cette surface focale ; un système de maintien sous vide ou à vis permettait de courber le film. Avec l'essor du numérique, les solutions chimiques de développement des plaques photos progressivement disparaissent, condamnant cette technique. Les télescopes de Schmidt ont alors évolué pour aplanir le champ par l'ajout de lentilles ou de miroirs (Brun 1953).

La problématique de la surface image courbe se pose également avec le développement d'instruments couvrant un champ de plus en plus important (Daukantas 2007). Les instruments actuels et futurs de surveillance céleste sont en constante augmentation depuis quelques années. L'objectif est de détecter les objets inconnus qui évoluent à proximité de la Terre (NEO « near-Earth objects »). Ils peuvent être naturels, comme les météorites et les étoiles encore non répertoriés, ou d'origine humaine, comme les débris d'anciens satellites ou d'engins spatiaux (CNES 2011). Ces derniers, en nombre croissant, représentent un danger non négligeable pour les prochains lancements et apportent des incertitudes lors des calculs d'orbites des prochains satellites (CNES 2003). Leur présence et leur position orbitale doivent donc être précisément connues, d'une part pour accroître notre connaissance de notre environnement, et d'autre part pour faire de la surveillance céleste. Ces missions de surveillance ont également pour objectif de prévoir les risques météoriques ou assurer la sécurité militaire afin de distinguer une attaque d'un pays hostile d'une « simple » météorite (Grayson 2002). Pour répondre à cette demande croissante en tenant compte de l'immensité de l'univers, l'angle de vue des télescopes doit augmenter et l'ouverture des systèmes optiques tend à augmenter également. Plusieurs télescopes très large champ (quelques degrés)

sont en cours de fabrication et les diamètres de leurs optiques peuvent atteindre 8 m (P. Jedicke & R. Jedicke 2008). C'est ainsi que le télescope LSST (Starr 2002) couvrira le ciel deux fois chaque semaine. Un champ de $3,5^\circ$ est photographié en 15 secondes sur un plan focal composé de 2,27 giga pixels.

Cependant, la résolution doit aller de pair avec cette augmentation du champ. Seule une résolution angulaire (et parfois spectrale) suffisante permet de déterminer l'origine de la lumière détectée, et ainsi caractériser l'objet observé : météorites, étoiles, supernovae... Dans les premiers télescopes large champ, l'élargissement de l'angle de vue était obtenu au détriment de la résolution en raison de la quantité de données générée. Actuellement, la résolution angulaire est recherchée afin de réaliser, à l'avenir, des cartes en trois dimensions du ciel avec suffisamment de détails pour détecter et localiser par exemple la matière noire, et mesurer l'expansion de l'univers (Liske, Grazian, et al. 2008). Ces besoins nécessitent des plans focaux de plus en plus grands et sont souvent composés d'un assemblage de détecteurs. L'augmentation de l'ouverture des optiques et du champ diminue le nombre d'ouverture N de ces caméras. Ces instruments sont alors plus sensibles à la courbure de champ, et par conséquence la surface image recherchée est plus courbée.

Différentes solutions existent actuellement pour corriger cette aberration. La solution traditionnelle est de rajouter des lentilles ou des miroirs, ce qui augmente la taille du système, complexifie le réglage..., et ne permet pas, malgré tout, d'obtenir une résolution égale et optimale sur toute la surface focale. Une deuxième solution consiste à corriger l'aberration par un traitement d'image. Les progrès des logiciels actuels permettent un gain, mais la qualité optique résultante est tout de même limitée par l'image initiale ; et ce n'est applicable qu'aux sources très lumineuses. Une autre solution consiste à paver une surface courbée par des plans focaux ; les détecteurs restent plans mais la faible inclinaison des détecteurs permet de limiter l'aberration hors axe. Cette solution est néanmoins difficile à réaliser et demande un temps de montage et d'intégration important. L'astronomie de très haute énergie, détectant des photons incidents d'énergie supérieure à 1 GeV, ne peut opérer que de cette manière là (Hinton & for the H. Collaboration 2004) (Cortina et al. 2009). Paver le plan focal courbé avec des détecteurs, induit un surcoût représentant environ la moitié du budget de chaque télescope. En effet, chaque détecteur doit être assemblé avec l'inclinaison adaptée et abouté aux plans adjacents ; ce montage est alors très complexe. Parmi les solutions de correction proposées, aucune ne répond réellement à la problématique sans détériorer la résolution.

La meilleure solution reste la courbure de la totalité du plan focal en accord avec le rayon de la surface focale. Elle facilite la conception de ces systèmes, complexes à optimiser ; le gain est autant en résolution qu'en simplification de l'architecture. Pour illustrer ces avantages, deux exemples d'instruments vont être détaillés. Ces résultats sont issus des rencontres faites lors de la conférence SPIE Astronomical Instrumentation, au cours de laquelle j'ai pu largement discuter de l'intérêt des détecteurs courbes dans l'astronomie. Les échanges qui ont suivi m'ont permis de quantifier et d'illustrer les avantages de la rétine courbe dans des instruments réels, et de développer un cahier des charges spécifique au domaine de l'astronomie.

A.III.2.1 - Etude de faisabilité de l'ESO

L'European Southern Observatory (ESO) a lancé une étude de faisabilité sur la courbure de détecteurs ; cette étude s'appuie sur un instrument existant, le CODEX (Luca Pasquini, Cristiani, et al. 2006) qui est prévu pour l'European Extremely Large Telescope (E-ELT) (Gilmozzi & Spyromilio 2008).

Cet instrument est composé d'un détecteur plan de 90x90 mm² qui fonctionne dans la gamme spectrale visible, et dont l'ouverture est de f/1,5. Il est constitué de huit lentilles et du vignetage est rajouté pour diminuer les angles d'incidence sur les dioptries. Le système plan est présenté à la Figure A-34.

Une nouvelle conception a été imaginée avec un plan focal courbé (Figure A-34 b); le rayon optimum est de 310 mm. Avec cette nouvelle géométrie, l'architecture est simplifiée : le nombre de lentilles est ramené à six ce qui diminue le nombre d'interfaces air / verre et augmente la transmission de 15 %. La qualité optique est améliorée et le vignetage est supprimé (Iwert & Bernard Delabre 2010).

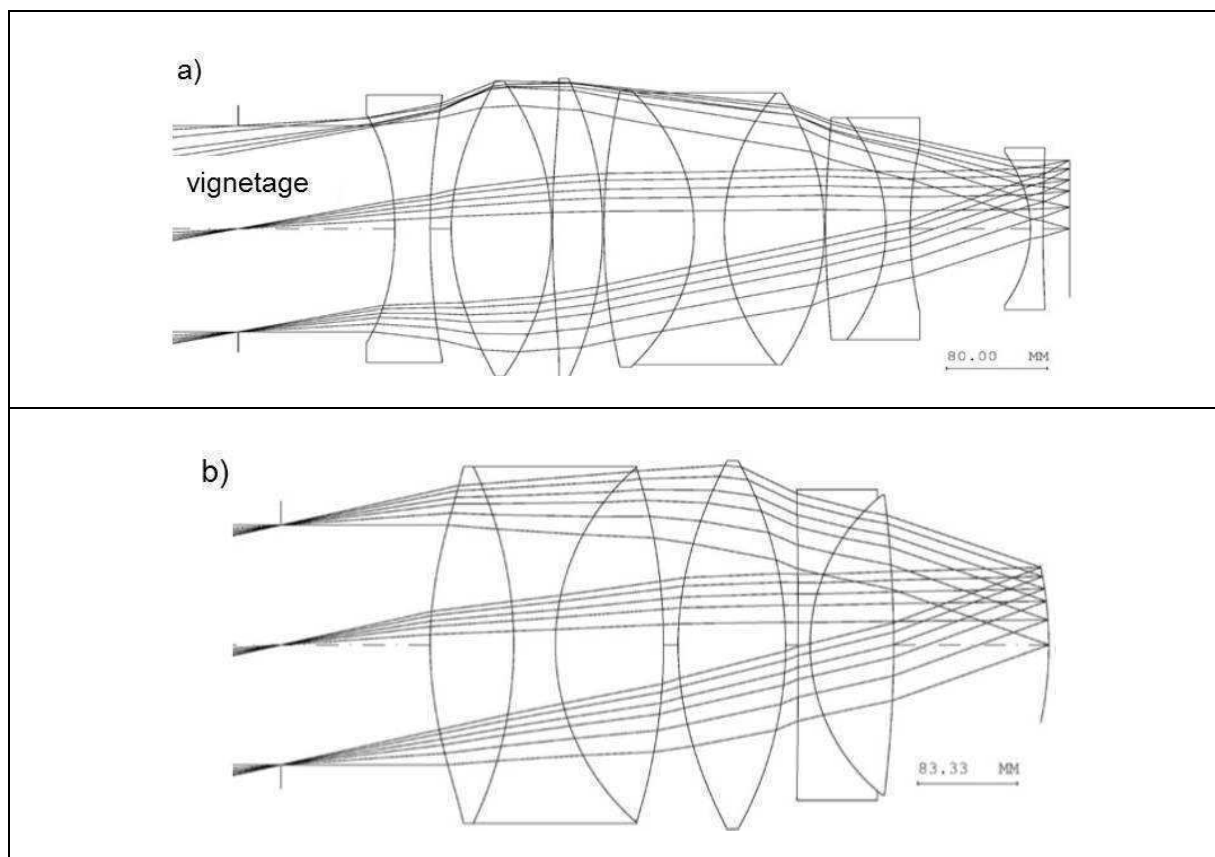


Figure A-34 : Conception optique du CODEX, - comparaison de l'architecture avec un détecteur plan (a) et un détecteur courbé (b)

A.III.2.2 - Projet OPTIMOS-EVE

Le deuxième exemple est un instrument développé par le consortium OPTIMOS-EVE, qui inclut l'Observatoire de Paris à Meudon (OBSPM). Les travaux ont abouti au projet éponyme qui est un des onze instruments répondant à l'appel d'offres lancé en 2007 par l'ESO pour équiper l'E-ELT. Cet instrument est un spectromètre multi objet à fibres optiques capable d'observer simultanément trois cents sources ; la bande spectrale est le visible et le proche infrarouge (300 nm - 1700 nm). Une matrice de fibres est positionnée sur le champ scientifique afin de collecter la lumière de chaque source et la transférer vers les spectrographes. Les spectres obtenus permettent de donner les informations spatiales et spectrales de ces objets (Navarro et al. 2010). La version qui sera montée est conçue avec un détecteur plan composé de deux matrices de 4000x4000 pixels ; la taille totale du plan focal est de 40x80 mm². Le système est ouvert à f/1,186 (Chemla et al. 2010).

Suite à notre rencontre, Philippe Laporte et Fanny Chemla de l'OBSPM ont travaillé sur cette architecture afin d'évaluer le gain d'un détecteur courbe. L'évaluation a porté sur la complexité de l'architecture et sur la qualité optique. La qualité image de ces systèmes est analysée par les diagrammes d'étalement du point image (PSF pour Point Spread Function). Ces caractérisations correspondent à la réponse impulsionnelle du système qui est éclairé par un point source ; dans l'idéal, la réponse est un disque du fait de la symétrie sphérique. En abscisses se trouvent les longueurs d'onde de $0,93\ \mu\text{m}$ à $1,7\ \mu\text{m}$, et en ordonnées l'angle de vue du système qui varie de 0° dans l'axe optique jusqu'à 7° en bord de champ. La résolution est de $60 \times 60\ \mu\text{m}^2$ et correspond à la taille du carré, qui représente l'élément de résolution de l'instrument. La qualité du système optique est étudiée selon la répartition de l'intensité dans le carré. Lorsque tous les points tombent dans le carré, alors 100 % de l'énergie incidente entrant dans l'instrument (à la transmission près) est dans l'élément de résolution ; ainsi, l'énergie est dite, en astronomie, encerclée (ou encadrée dans le cas d'un pixel carré).

Dans le cas où le détecteur est plan (Figure A-35 a), l'architecture optique est composée de huit lentilles dont trois sont asphériques ; un triplet complexe à fabriquer est situé au plus près du plan focal. L'analyse des réponses impulsionnelles montre que le système optique ne répond pas aux spécifications en bord de champ. Hors de l'axe la résolution est supérieure à celle demandée ; l'énergie s'étale en dehors du pixel et tombe sur les pixels adjacents, ce qui augmente le bruit de fond et dégrade la qualité image.

Lorsque le détecteur est courbé à un rayon de 318 mm (Figure A-35 b), le deuxième bloc est changé et le triplet proche du détecteur est maintenant constitué de lentilles beaucoup plus simples (suppression d'une lentille, en bleu sur le dessin). La caractérisation optique montre que tous les diagrammes sont dans les spécifications pour chaque longueur d'onde et sur tout le champ. Que ce soit au centre et sur les bords de champ, le système répond très bien aux spécifications demandées et le résultat n'est pas bruité. Le gain optique, comparativement au plan, est impressionnant. Ce système présente la meilleure qualité optique que l'on peut obtenir, mais la complexité de l'architecture a été conservée. Un avantage invisible sur ce diagramme est le gain en temps de conception. Dans le cas de la première figure, où la PSF déborde du pixel, les opticiens en charge de la conception cherchent à optimiser la formule optique, essaient de nouvelles combinaisons, jouent sur les matériaux des éléments optiques pour tenter d'améliorer la PSF. Le temps nécessaire à l'exploration de l'ensemble de ces possibilités se compte parfois en semaines et donc en dizaines de milliers d'euros. Dans le cas du détecteur courbe, au contraire, une fois que l'on a trouvé les blocs optiques nécessaires à la création des fonctions, l'optimisation est immédiate car le rayon de courbure du détecteur devient un paramètre et non une contrainte.

Une version simplifiée de ce système est proposée par le système c (Figure A-35 c). L'architecture de l'instrument est constituée d'un détecteur courbé à un rayon de 335 mm. Ce rayon légèrement plus important que le précédent, permet de supprimer une lentille (en bleu sur le schéma) et de remplacer par des lentilles sphériques deux asphériques sur les trois du système plan (en jaune). La caractérisation montre que la résolution est toujours très bonne par rapport au système b. Pour chaque longueur d'onde et sur tout le champ, la résolution est conforme aux spécifications et la réponse impulsionnelle est meilleure que celle obtenue avec le détecteur plan. Ainsi, le gain en transmission est augmenté de 1 %, le rapport signal sur bruit est meilleur (Laporte 2011).

Ce gain peut paraître négligeable, mais les flux en astronomie sont très faibles et requièrent plusieurs heures de pose, même avec des télescopes de 40 mètres de diamètre. Ainsi, ce gain de 1 % sur le concept optique, c'est-à-dire obtenu dès le début de la conception, permet de soulager les contraintes qui pèsent sur les autres corps de métier et de gagner en sensibilité.

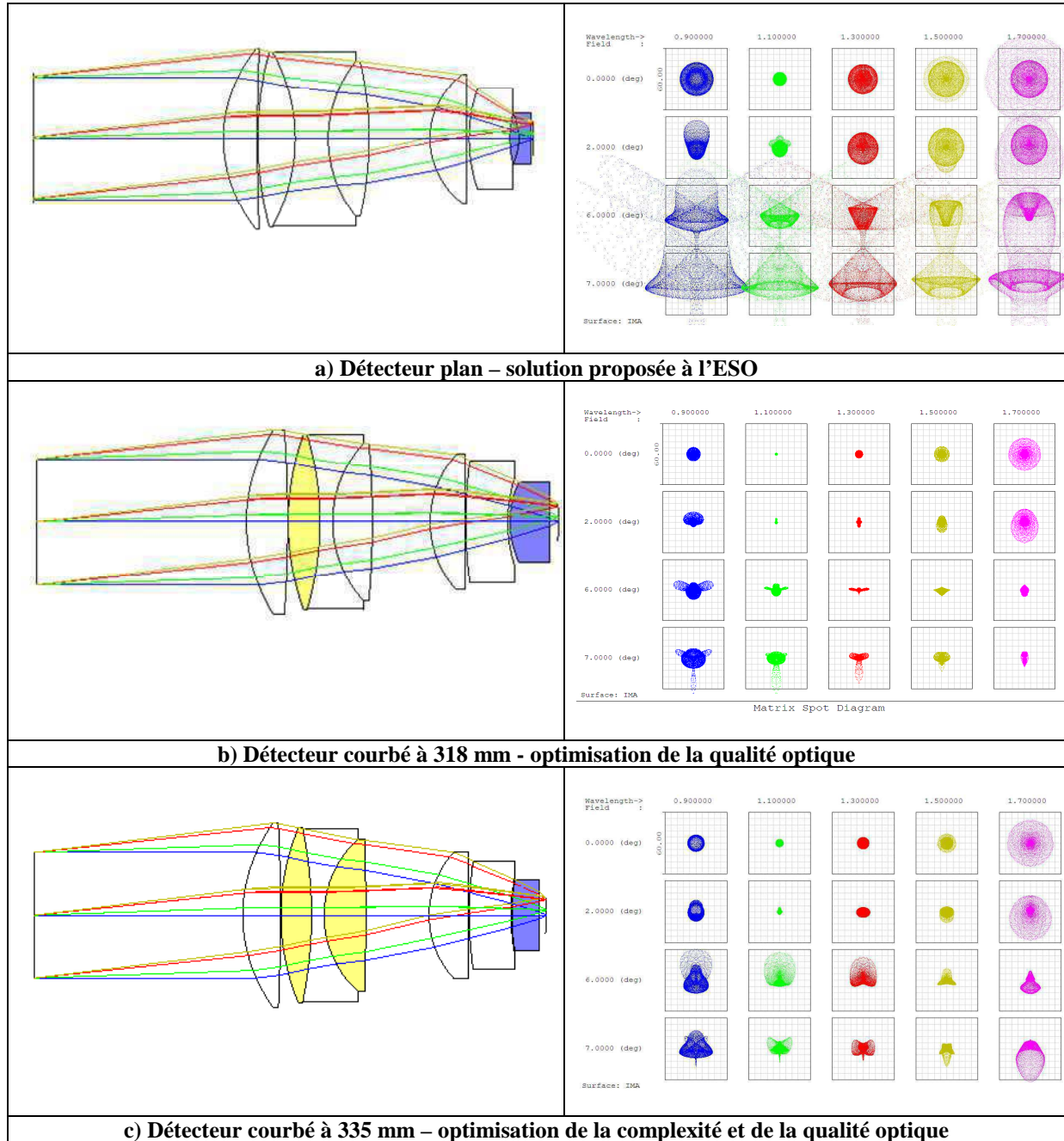


Figure A-35 : Comparaison de l'architecture OPTIMOS-EVE avec un détecteur : a) plan et b) et c) courbé
A gauche : schéma optique, avec en jaune : les lentilles asphériques devenues sphériques et en bleu suppression d'une lentille dans le triplet proche du plan focal ; A droite : réponse impulsionnelle

Courbure & Astronomie

La courbure du plan focal permet de simplifier l'architecture par la suppression de lentilles asphériques au profit de lentilles sphériques. En effet, les asphériques nécessaires aux instruments dédiés à l'astronomie sont complexes à fabriquer, chères et longues à approvisionner ; elles sont également plus difficiles à aligner. Par conséquence, le gain de la courbure du détecteur se traduit également par une meilleure gestion du projet. D'une part, la conception est optimisée plus aisément grâce à la suppression de l'aberration de courbure, et d'autre part, le montage est simplifié et plus facilement réalisé. Ce gain est important étant donné que le montage est réalisé plusieurs fois ; d'abord au laboratoire après la caractérisation des lentilles lors de leur réception, puis sur le lieu de l'observation.

Outre ces exemples, de plus en plus de concepteurs d'instruments spatiaux évaluent l'apport d'un détecteur courbe. La courbure recherchée est faible (rayons entre 300 mm et 500 mm) mais serait bénéfique aux instruments, comme l'illustre les références (CFHT 2010) (Swain 2004). Les arguments énoncés dans ces références rejoignent celles exposées précédemment. La courbure permet de simplifier les optiques (suppression d'asphériques et diminution du nombre de lentilles), de diminuer le volume et donc le poids du système, ce qui représente un gain en coût et dans la réalisation du projet. Ces paramètres sont prépondérants dans les projets d'astronomie : télescopes large champ au sol et spatiaux.

A.III.3 - Applications des caméras miniatures dans le domaine militaire

Dans le domaine militaire, la miniaturisation présente un avantage important. Les caméras miniatures ouvrent la voie à des applications qui jusqu'à présent ne possédaient pas de système de détection. De nombreux équipements sont actuellement aveugles, ou ont une faible capacité de reconnaissance, par exemple certains projectiles, drones... La diminution du volume et du poids ne sont pas les seules exigences, puisque l'on recherche aussi une diminution de la consommation en énergie et des coûts. On peut citer entre-autres les spécifications des matériels mains-libres du fantassin pour lesquels l'autonomie des batteries et l'ergonomie sont des enjeux cruciaux. Ces exigences sont capitales pour la mobilité.

Outre cette miniaturisation, la recherche dans ce domaine, porte également sur l'augmentation du champ. Les systèmes mains libres actuels présentent des angles de vue de 30° à 50°. Comparativement au potentiel visuel humain qui est de 180°x120°, l'observation via des systèmes de surveillance restreint énormément le champ. Dans le domaine militaire, la capacité de visualisation du théâtre des opérations est primordiale ; obtenir un maximum d'informations est un gage de sécurité et conditionne la réussite d'une intervention. Si les systèmes optiques couvrent un champ proche de celui de l'œil humain, alors le gain est immense. Trois techniques de miniaturisation vont être étudiées dans cette partie ; la première s'appuie sur des jumelles commercialisées par Thales Angénieux, la deuxième s'inspire de la vision multi-pupillaire des invertébrés, et la dernière est le sténopé basé sur les travaux de l'ONERA.

A.III.3.1 - Application industrielle : jumelles infrarouge

L'utilisation de détecteurs courbes dans les systèmes optiques portables a été discutée avec Thales Angénieux. Cette entreprise a un savoir faire reconnu dans l'équipement des fantassins et notamment dans les jumelles infrarouge, à base de détecteurs non refroidis dans la bande spectrale $8\text{ }\mu\text{m}$ - $12\text{ }\mu\text{m}$. Les discussions que j'ai pu avoir avec les concepteurs m'ont permis de mesurer leur intérêt pour les détecteurs courbés ; ces échanges ont été poursuivis afin d'étudier l'apport technologique de la courbure dans leur gamme de produits pour les caméras grand champ et petit champ. Leur retour (Rollin 2011) corrobore les avantages optiques qui ont été présentés dans les parties précédentes.

Pour les produits grands champs typiquement 40° , la courbure du plan focal permet de gagner en ouverture pour le même nombre de lentilles. L'ouverture passe de 1,2 à 0,95 pour une performance optique égale, ce qui est difficilement accessible avec un capteur plan. Pour une ouverture constante, une asphérique sur les deux peut être supprimée ; la performance optique obtenue est similaire au système plan. Cependant, la suppression d'une asphérique représente un gain estimé à 10 % dans le coût du système. Pour ce cas, le rayon de courbure visé est entre 44 mm et 50 mm ; le détecteur est un micro-bolomètre de type TV/4. Pour les petits champs, par exemple les applications de lunettes de tir, le gain lié à la courbure est moins marqué. Le nombre d'asphériques reste constant ; cependant la qualité optique augmente de 25 % avec une même ouverture pour le système plan et courbe. A qualité égale, le détecteur courbe permet un faible gain sur l'ouverture. Dans ces architectures, le rayon est approximativement de 120 mm.

Le système idéal serait composé d'une seule lentille. Le détecteur courbe apporterait alors un gain optique important comparativement à la qualité obtenue avec un capteur plan. Par contre, pour des ouvertures importantes ($f/1$ à $f/1,2$), même avec un détecteur courbe, une solution à lentille unique ne permet pas d'atteindre les spécifications de qualité. Des aberrations autres que la courbure prédominent alors.

Leur évaluation a également porté sur les combinaisons à base de détecteurs refroidis. Dans ce domaine, l'utilisation de rétines courbes permettrait certainement des gains plus spectaculaires, en effet, ces systèmes sont plus fermés, mais présentent des transports d'image convergents afin de ramener les pupilles sur l'écran froid du détecteur. Comme ils comportent une succession de relais convergents, la courbure est naturellement accentuée.

Les gains économiques apportés par la courbure du détecteur sur la combinaison optique sont à mettre en balance avec le sur-coût de réalisation d'une rétine courbe par rapport à une matrice plane. Cette mise en perspective serait à mener dans le cadre d'une industrialisation.

Courbure & applications militaires

Pour des premières applications dans le domaine militaire, les rayons de courbure recherchés varient entre 45 mm et 130 mm. Les détecteurs infrarouge utilisés dans les applications militaires sont majoritairement des bolomètres de type TV/4. Ces composants correspondent aux véhicules de test de ma thèse ce qui permet de mettre directement en parallèle les résultats obtenus avec les applications industrielles potentielles. Leurs besoins forment un cahier des charges qui a permis d'aiguiller mon développement technologique. La

conformité de mes travaux avec les composants utilisés dans l'industrie permettra un rapide transfert de savoir faire.

Pour terminer cette analyse des besoins, il faut préciser que la courbure de détecteurs est une nouveauté pour les concepteurs. Bien que le potentiel des détecteurs courbes soit important, cette nouvelle variable nécessite une remise en question des voies traditionnelles de conception et d'optimisation. Actuellement, les premières évaluations ont été menées sur l'amélioration des produits existants, ce qui nécessite une étude au cas par cas, mais les détecteurs courbes pourraient permettre l'élaboration de systèmes optiques de rupture que nous allons traiter dans les deux parties suivantes.

A.III.3.2 - Caméra en rupture : œil d'insecte

Parmi les solutions de miniaturisation proposées dans la première partie, il en est une particulièrement prometteuse, qui est en rupture avec l'architecture traditionnelle optique. S'inspirant de la vision multi-pupillaire des insectes et des crustacés, la sous-division du plan focal en différentes voies optiques, permet une diminution extrême de l'encombrement et une augmentation du champ.

A.III.3.2.1 - Structure naturelle

La structure multi-pupillaire est majoritaire chez les invertébrés comme les insectes, les crustacés, les arachnides. Elle correspond à un groupement de facettes qui sont courbées sur une surface hémisphérique convexe, formant des voies optiques distinctes. Chacune d'elle est composée d'une lentille focalisant sur la même rétine courbée également en convexe.

On distingue deux principales architectures : apposée (insectes) et superposée (insectes nocturnes ou crustacés du fond des océans) qui se différencient par leur organisation optique et le mode de reconstitution de l'image. Dans les systèmes apposés, les facettes sont isolées les unes des autres par des poils pour éviter la formation d'images parasites. Chaque facette voit la scène sous un angle légèrement différent, comme l'illustre la Figure A-36. Le traitement de ces « imageries » par le cerveau permet de reconstituer une image globale de la scène.

Les systèmes superposés sont organisés en convexe, mais les facettes ne sont pas isolées les unes des autres. Chacune observe une partie de la scène et les voies adjacentes contribuent à l'éclairement d'un même photorécepteur. L'image finale se forme par superposition de l'information de chaque voie. Le flux lumineux est alors plus important et ces systèmes sont particulièrement adaptés aux insectes évoluant dans une faible luminosité comme les insectes nocturnes ou marins.

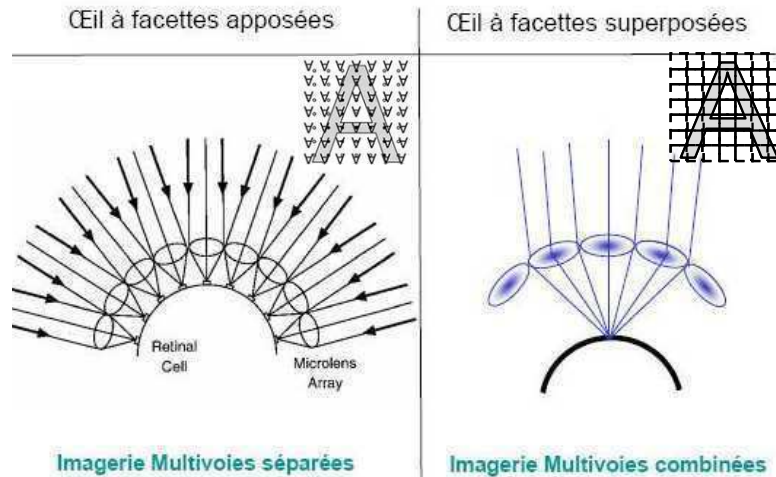


Figure A-36 : Systèmes visuels multi-pupillaires: apposés et superposés

A.III.3.2.2 - Biomimétisme

Il existe dans l'état de l'art de nombreux systèmes artificiels s'inspirant de ces principes. Cependant, la reproduction exacte est impossible à réaliser actuellement ; en effet, les détecteurs issus de la microélectronique sont tous plans, alors que les systèmes naturels ont une organisation convexe des photorécepteurs. Cette planéité diminue l'angle de vue et complique la division du champ en facettes. Les axes optiques doivent donc être inclinés afin de simuler l'organisation convexe. Ce paragraphe va me permettre de présenter quelques systèmes biomimétiques afin de montrer par la complexité des architectures, l'avantage qu'apporterait le détecteur courbé.

Chez les insectes (Figure A-37 a), la courbure hémisphérique des lentilles et du plan focal permet d'incliner naturellement les axes optiques et d'accéder ainsi à de larges champs. Dans les systèmes artificiels, cette inclinaison doit être générée. Dans la majorité des cas, elle est obtenue par une matrice de trous placée derrière les microlentilles. Le schéma de la Figure A-37 b illustre cette organisation qui est à la base de toutes les réalisations biomimétiques. Elle se compose de matrices de microlentilles, de trous et de photodiodes. L'inclinaison de l'axe est obtenue par le pas variable des trous de chaque facette, comme l'illustre la Figure A-37 b (Duparre, Dannberg, et al. 2004).

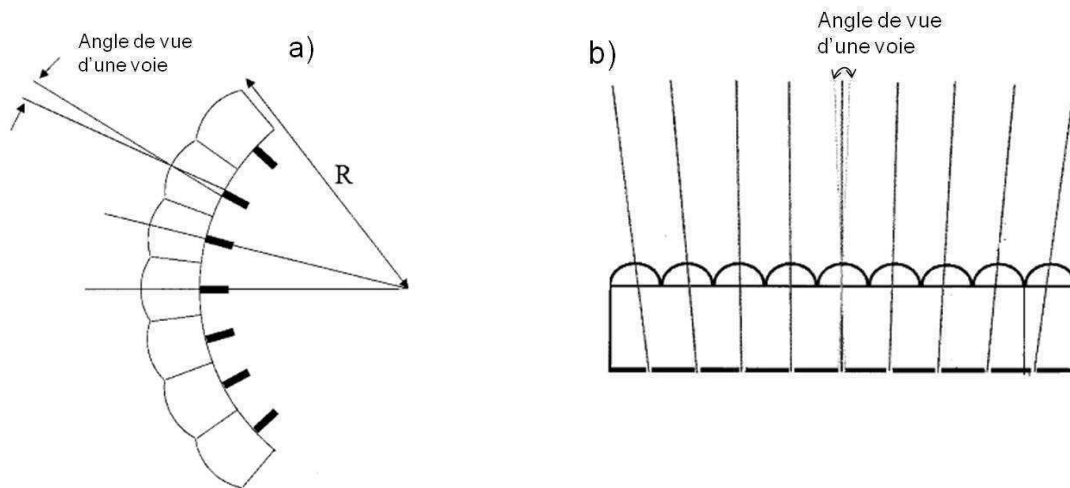


Figure A-37 : a) œil d'insecte ; b) œil artificiel apposé

Cependant, cette structure présente l'inconvénient d'excentrer les faisceaux par rapport au centre optique, créant des aberrations, notamment l'astigmatisme et la courbure de champ. La solution proposée par Duparré et Wippermann (Duparré, Wippermann, Dannberg, et al. 2005) consiste à utiliser des lentilles de forme ellipsoïdale ou sphérique, selon leur position dans le champ. En effet, les structures multi-pupillaires permettent de corriger chaque voie selon les aberrations en présence. Grâce aux progrès de la microtechnologie, cette correction adaptée est réalisable mais elle complexifie la fabrication et le montage du système.

L'augmentation du champ de cette structure est obtenue par l'ajout d'une lentille divergente (Hamanaka & Koshi 1996) (Figure A-38 a) ou d'une matrice de déflecteurs (Duparré et al. 2005) (Figure A-38 b). Néanmoins, ces solutions augmentent le volume global du système.

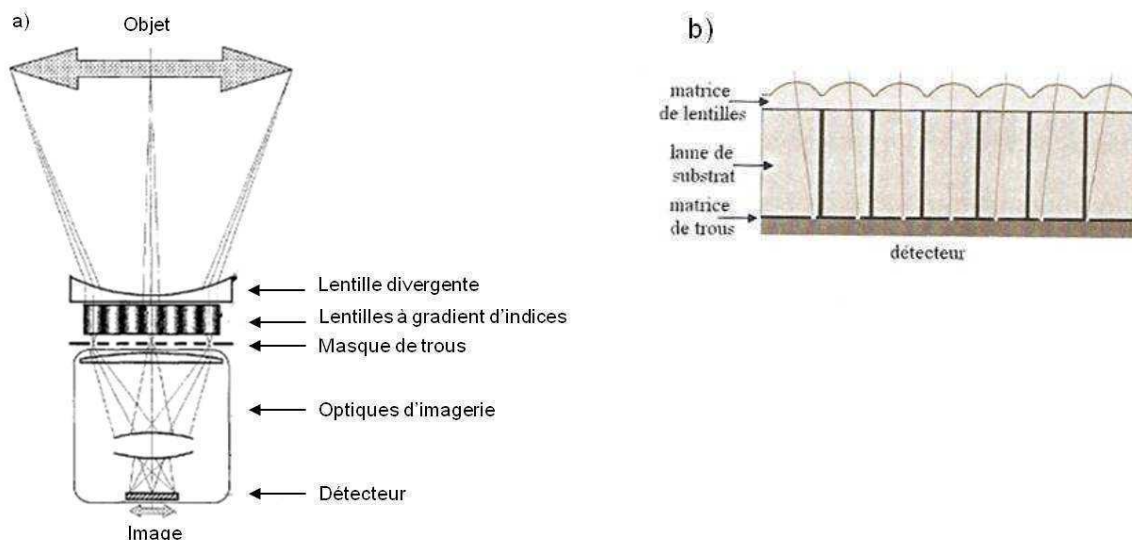


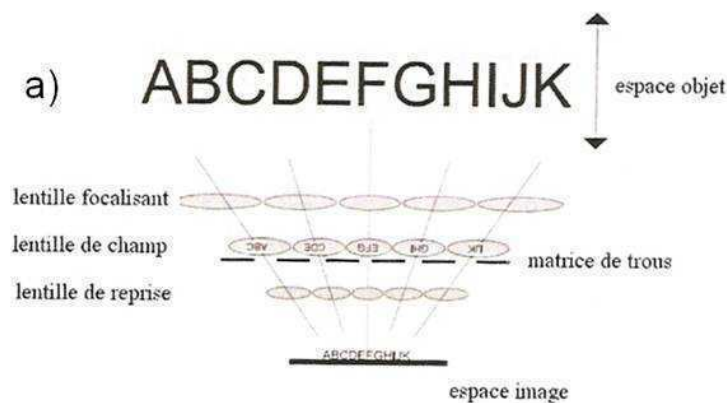
Figure A-38 : Structures réalisées par : Hamanaka et al (a) et Duparré et al (b)

Les systèmes décrits jusqu'à présent s'inspirent de la vision apposée des insectes. Le nombre de photorécepteurs est faible pour chaque voie ; la résolution angulaire est donc moins bonne. Elles sont présentées dans le Tableau A-5 pour les deux exemples précédents et sont comparées à des systèmes s'inspirant de la vision d'un insecte particulier : le *Xenos Peckii* (Segelken 1999).

	Système apposé		Système inspiré du <i>Xenos Peckii</i>	
	Hamanaka	Duparré	Duparré	Druart
Nombre de voies	50x50	130x130	8x3	5x5
Champ	27,4°	20°	33°x12°	30°
Résolution angulaire	1,5°	0,67°	0,3°	0,12

Tableau A-5 : Comparaison des résolutions angulaires obtenues par les systèmes inspirés de la structure apposé ou de type *Xenos Peckii*

Le système visuel du *Xenos Peckii* correspond à une architecture en facettes, mais du fait de sa structure particulière composée de 50 yeux avec pour chacun une centaine de photorécepteurs, sa résolution angulaire est bien meilleure. Les systèmes artificiels qui s'inspirent de cette architecture font face néanmoins à la même problématique : les axes optiques doivent être inclinés. Les solutions proposées dans l'état de l'art sont composées de trois étages de lentilles, un masque de trous et d'un détecteur matriciel plan (Figure A-39 a). La solution de la référence (Druart, Guérineau, et al. 2009) comprend également une matrice de prismes afin d'élargir le champ (Figure A-39 b).



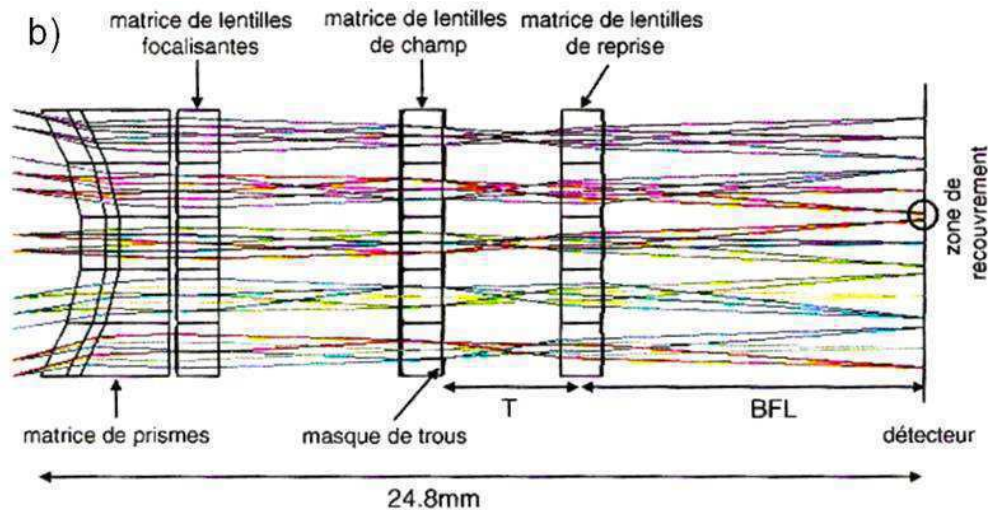


Figure A-39 : Structure bi inspirée du *Xenos Peckii* a) Duparré et al et b) Druart et al

La deuxième difficulté, liée à la planéité du plan focal, concerne la division du champ. Dans la structure naturelle, les facettes sont organisées en hexagone, ce qui permet une division homogène du champ et une répartition uniforme sur le plan focal. Au contraire, lorsque le détecteur est plan, il ne peut être découpé qu'en carrés et des zones du champ ne sont pas imagées. Il est alors nécessaire de prévoir des zones de recouvrement afin de reconstruire toute la surface observée. Les images de la Figure A-40 illustrent cette difficulté.

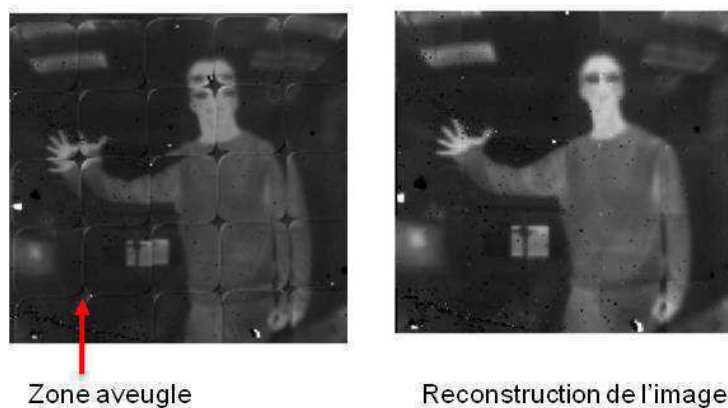


Figure A-40 : Reconstruction de l'image

Courbure et bio-mimétisme

Le bio-mimétisme des structures multi-pupillaires offre des systèmes de détection innovants et miniatures. Cependant, la planéité du détecteur ne permet pas de profiter pleinement de cette structure. Les axes optiques de chaque voie sont inclinés par une matrice de trous, complétée le plus souvent d'étages de lentilles supplémentaires, pour augmenter le champ. Ces systèmes sont finalement complexes (microlentilles, prismes) et difficiles à mettre en œuvre par leur fabrication et l'intégration des différents étages (faible tolérance).

Ainsi, pour profiter pleinement des avantages d'un système multi-pupillaire, ces caméras multivoies nécessitent un détecteur courbe convexe, facilitant ainsi la conception. Ces applications forment la deuxième application adressée par mes travaux de thèse.

A.III.3.3 - Caméra miniature : chambre noire

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons vu qu'une solution de miniaturisation consiste à diminuer le nombre d'ouverture en réalisant un sténopé ou une chambre noire. Ce système est décrit par Aristote puis Léonard de Vinci au XVI^{ème} siècle pour une utilisation qui donnera naissance aux premières caméras et aux premiers instruments d'astronomie (Lindberg 1968). Ce système très simple n'est composé d'aucune lentille, mais une ouverture circulaire de diamètre s permet d'imager un objet sur un détecteur, placé à une distance d de l'ouverture (Figure A-41).

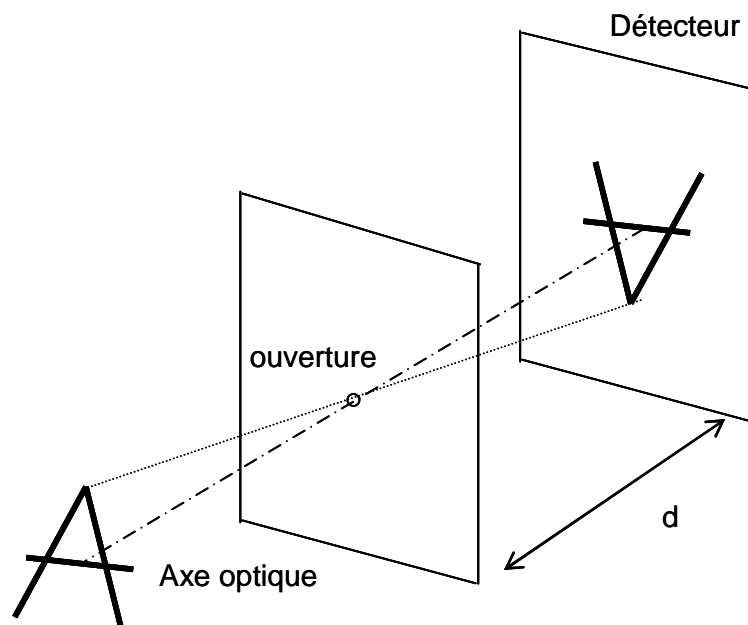


Figure A-41 : Système simplifiée d'une chambre obscure

Ce système présente plusieurs avantages dont une grande profondeur de champ et un large angle de vue ; il est également dépourvu d'absorption et de distorsion (Young 1971). Malgré l'absence de lentille, ce système constitué d'un capteur plan est dégradé par des phénomènes similaires à l'aberration de courbure de champ. Le rapport photométrique est dégradé par la

différence du chemin parcourue selon l'angle d'inclinaison. Hors axe, l'étendue calculée pour un point incliné d'un angle θ par rapport à l'axe, est dépendante de $\cos^4\theta$; on retrouve la loi du « cosinus puissance 4 » que j'ai détaillée dans la partie précédente. L'éclairement hors axe est alors beaucoup plus faible, voire quasi nulle. Comme la résolution angulaire tangentielle d'un tel système dépend également de cet angle d'inclinaison, la résolution est diminuée hors axe. Cette perte de résolution est démontrée par Young et al (Young 1971). Elle évolue avec le carré du cosinus de l'angle d'inclinaison contrairement à l'éclairement qui dépend du cosinus à la puissance 4.

Différentes solutions existent dans l'état de l'art pour augmenter le champ du sténopé jusqu'à 180°. Les solutions dans le visible nécessitent l'ajout d'une surface supplémentaire afin de diminuer l'angle de réfraction de ces rayons fortement inclinés (Franke 1979) (Hsu 1982) (Tisse 2005). Dans l'infrarouge, Druart et al (Druart, Guerineau, et al. 2009) proposent de placer un ménisque devant l'ouverture afin de diminuer les angles d'incidence des faisceaux fortement inclinés sur la face incidente. Ces systèmes se complexifient et l'avantage de la miniaturisation disparaît quelque peu. L'utilisation d'un détecteur courbé dans ces applications permet de supprimer la courbure de champ et ainsi la qualité optique du système est optimisée sans augmenter l'encombrement. Les auteurs quantifient le gain apporté par le détecteur courbe dans cette architecture. Le graphe de la Figure A-42 montre l'évolution du rapport photométrique pour un capteur courbé par rapport à un capteur plan. Pour une étendue $G(\theta)/G(0^\circ) = 0,5$, le système avec un plan focal courbé présente un champ deux fois supérieur au système plan.

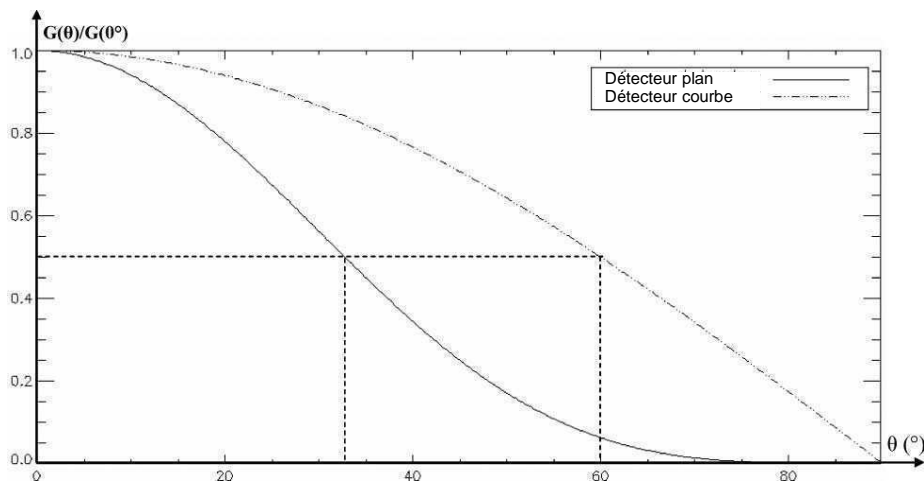


Figure A-42 : Le gain apporté par la courbure du plan focal (Druart et al. 2009)

La recherche d'une diminution extrême du volume rejoint finalement les systèmes présents dans la nature. L'œil humain est composé d'une seule lentille et d'une rétine courbe concave. Basé sur ces constats et sur ces avantages théoriques démontrés, l'œil humain est un système idéal à reproduire qui fera l'objet de cette thèse.

Courbure du plan focal & applications concrètes

Cette partie a mis en évidence les avantages de la courbure du plan focal dans trois domaines d'application : analyse spectrale, astronomie et militaire. Pour chaque domaine, l'intérêt pour ces nouveaux détecteurs a été unanime et a suscité de plus amples discussions qui ont permis la rédaction de cette partie. Chaque application a ses propres besoins (tailles de détecteurs et courbures variables) et ces différentes spécifications construisent le cahier des charges de ma thèse, permettant également à plus long terme de construire le schéma de développement des détecteurs courbes.

Conclusion du premier chapitre

Ce premier chapitre a permis de répondre à la question « pourquoi courber un détecteur ? ». La problématique majeure de la conception optique est la correction des aberrations dégradant la surface focale. Parmi les cinq aberrations géométriques, la courbure de champ a pour résultat la formation d'une image courbe d'un objet plan. Elle est considérée comme une aberration du fait de la contrainte qu'apporte la planéité du détecteur sur la conception. Cette planéité étant un dénominateur commun aux divers systèmes optiques, la surface image doit être aplanie. Les systèmes corrigés de toutes les aberrations sont généralement complexes et volumineux, ce qui va à l'encontre de la tendance actuelle de miniaturisation des systèmes.

Pour atteindre une diminution de l'encombrement des systèmes large champ, deux solutions basées sur le biomimétisme sont prometteuses. La première est une rupture dans la conception optique : le système inspiré de l'œil d'insecte est multivoie, fortement courbé en convexe pour profiter d'une miniaturisation extrême. La deuxième solution consiste à conserver la structure de la caméra monovoie et de courber, généralement en concave, le plan focal afin d'éliminer l'aberration de courbure de champ. Tous les faisceaux focalisant à la même distance du centre optique et ainsi la résolution du système, le rapport photométrique et l'homogénéité hors axe sont augmentés. Ces avantages purement optiques ont également des retombées positives sur la conception du système.

Ces avantages ont été mis en évidence pour des instruments réels de spectrométrie intégrée, des télescopes large champ et des solutions de miniaturisation des caméras militaires. Ces études ont permis de dégager trois voies d'intérêt à la courbure du plan focal :

- la courbure cylindrique à faible courbure
- la courbure sphérique à forte courbure et détecteurs infrarouge type TV/4
- la courbure sphérique à faible courbure et large format de détecteurs type TV

Ces besoins ont permis de définir le cahier des charges de la thèse. L'intérêt principal est la courbure sphérique dont les résultats permettent de couvrir la déformation cylindrique. Ensuite deux types de détecteurs peuvent être envisagés pour la thèse : les grands plans focaux d'astronomie et les détecteurs type TV/4 des applications militaires. L'intérêt s'est porté vers les détecteurs de type TV/4 permettant de répondre à la miniaturisation des caméras

en réalisant des systèmes simples à une ou deux lentilles. De plus, les besoins couvrent une large gamme de rayons de courbure, ce qui est particulièrement intéressant pour mener une étude complète.

Les travaux de thèse permettront l'étude des deux solutions de miniaturisation. La courbure convexe pour les systèmes multivoies nécessite un développement technologique supplémentaire à la seule courbure convexe du plan focal, notamment pour réaliser la matrice de lentilles courbe.

Au contraire, les systèmes type œil humain peuvent être réalisés « simplement », nonobstant la courbure du plan focal ! Deux systèmes optiques seront réalisés : un œil humain à monocle (deux lentilles) et un œil humain (une seule lentille). Ce dernier sera l'objet de la démonstration de mes travaux. La fonctionnalité d'un tel système ouvre de grandes perspectives. En effet, considérant son volume, son utilisation est prometteuse dans de nombreuses applications (robots, drones, caméras cailloux...).

La question « pourquoi courber un détecteur ? » venant d'être traitée, nous allons développer la problématique suivante : « comment courber un détecteur ? ».

CHAPITRE B LA PHYSIQUE DE LA COURBURE

Introduction

Tous les détecteurs utilisés en spectrométrie, dans les caméras et les instruments d'astronomie, sont plans. Mais la « simple » déformation sphérique induit des avantages majeurs au niveau de la qualité optique et de la conception du système. Cependant, la conversion d'un plan en une calotte sphérique est une opération complexe. Cette difficulté apparaît lorsqu'une pomme est enveloppée dans une feuille d'aluminium : il se forme inévitablement des pliures. La problématique inverse apparaît en cartographie. La réalisation d'un planisphère nécessite de projeter la Terre sur un plan en deux dimensions. Différents types de projection existent, mais chacune d'elles apporte une distorsion qui modifie soit les distances, soit les angles (A. Bourcstein & L. Bourcstein 2006). Un planisphère exact est obtenu par une carte à trous ; une fois reconstituée, la carte de la terre forme une sphère (Figure B-1) : c'est la projection de Fuller.

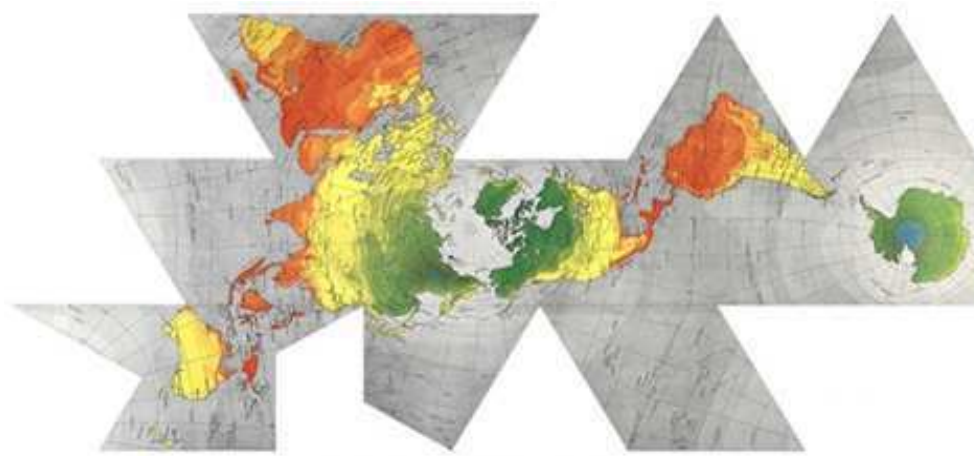


Figure B-1 : La projection de Fuller (Buckminster Fuller Institute 2011)

Qu'on ne puisse conserver à la fois les distances et les angles s'explique par le théorème de Gauss, Theorema Egregium (Porteous 2001). Ce théorème stipule que si la déformation d'une surface $S1$ en une surface $S2$ est obtenue par isométrie locale, alors la courbure de Gauss de $S1$ est préservée en tout point. Ce paramètre s'obtient en effectuant le produit des courbures principales de la surface. Sans entrer dans les détails de calculs de la géométrie différentielle (Taylor 1996), je vais évaluer grâce à la courbure de Gauss, les transformations d'un plan en un cylindre et en une sphère (Figure B-2).

Un plan est défini par une courbure constante $k = 0$. Un cylindre a une courbure nulle et une positive ($k = 1/R_1$), leur produit est alors nul. La transformation d'un plan en un cylindre est obtenue par isométrie, leur courbure de Gauss est égale. En effet, on peut former un cylindre à partir d'un plan, il suffit de l'enrouler. Au contraire, une sphère a deux courbures constantes non nulles en tout point. La transformation d'un plan en une sphère n'est donc pas accessible par isométrie locale. Le passage de l'un à l'autre ne peut donc se faire qu'en étirant le plan pour couvrir toute la surface courbe (Banchoff & Lovett 2010).

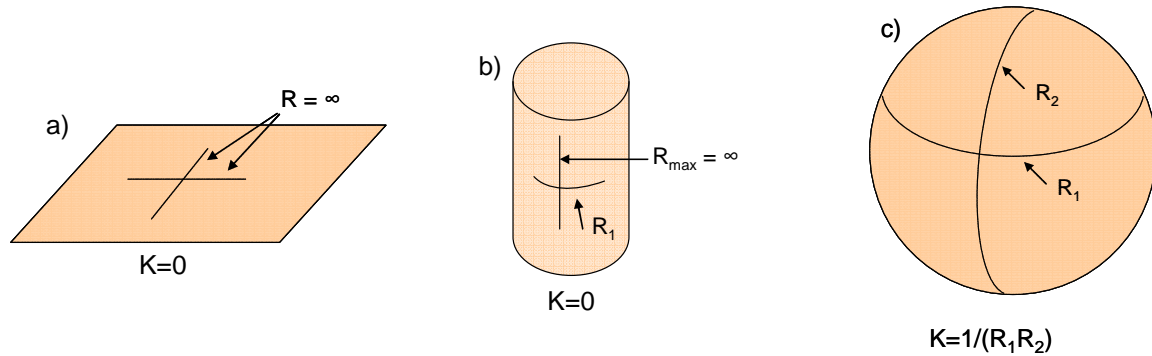


Figure B-2 : Courbures des surfaces a) plane ; b) cylindre ; c) sphère

La forme sphérique est très présente dans la nature ; c'est la forme qui permet le plus grand volume avec le minimum de surface (Bourguignon 2003). L'évaluation des objets sphériques qui nous entourent montre que la sphère est soit :

- issue de matériaux très élastiques et déformables comme la bulle de savon ou le ballon de baudruche,
- fabriquée à partir de matériaux rigides, et dans ce cas, la courbure n'est pas obtenue directement.

Par exemple, les lentilles sphériques sont fabriquées par polissage à partir d'un matériau brut, ou par usinage avec une pointe diamantée. Il est intéressant de noter que le polissage d'une surface avec un mouvement aléatoire va former une concavité sphérique dans le matériau. Les ballons de football ou les balles de tennis sont fabriquées par la couture de plusieurs pièces, au minimum deux. Le ballon de football est formé de pentagones et d'hexagones ; la balle de tennis est un assemblage de deux pièces. La forme est donc issue d'une structure particulière, composée de plusieurs fragments de matériaux reliés les uns aux autres.

Les premiers plans focaux sphériques en astronomie étaient des films plastiques maintenus par aspiration sur une face, ce qui permettait de les courber afin de corriger l'aberration de courbure de champ. La courbure recherchée bénéficiait de la souplesse du matériau. Néanmoins, en microélectronique, force est de constater que les matériaux utilisés sont davantage caractérisés par leur rigidité que par leur souplesse. Ainsi la courbure des détecteurs a longtemps été perçue comme une opération impossible à réaliser.

Avec les progrès actuels des micro-technologies, l'opportunité de développer des composants courbés s'est confirmée. En effet, différents travaux (Reuss et al. 2005) ont déjà permis à des composants intrinsèquement rigides, d'obtenir une certaine flexibilité. Ces solutions se sont orientées vers des substrats de deux types : amincis ou souples, tels que les polymères. Néanmoins, la courbure sphérique n'est pas adressée par ces recherches. Ce sujet en est donc à ses prémices, pénalisé par un a priori encore tenace.

Ce chapitre a pour objectif de répondre à la question : « comment courber un substrat silicium initialement plan ? ». Dans une première partie, je présenterai les techniques de passage d'un plan à une forme sphérique ; ceci nous permettra de comprendre les différentes méthodes de mise en forme qui existent dans la littérature. Dans la partie suivante, je détaillerai le procédé de courbure que j'ai développé durant la thèse pour répondre à cette problématique. Il a été mis en œuvre sur des échantillons de silicium, matériau de base de la microélectronique. Il est effectivement présent dans les deux types de détecteurs infrarouge sur lesquels j'ai travaillé :

les imageurs quantiques et thermiques. La dernière partie de ce chapitre sera consacrée aux résultats de l'étude matériau, où le comportement mécanique du silicium sera étudié en fonction du rayon de courbure et de l'orientation donnée, concave ou convexe. Ces résultats seront confrontés aux simulations de courbure réalisées avec un logiciel de calcul par éléments finis (ANSYS).

B.I - Mise en forme d'une sphère

B.I.1 - Analyse géométrique

La courbure du plan focal se traduit par la transformation d'un carré, forme initiale d'une puce, en une calotte sphérique.

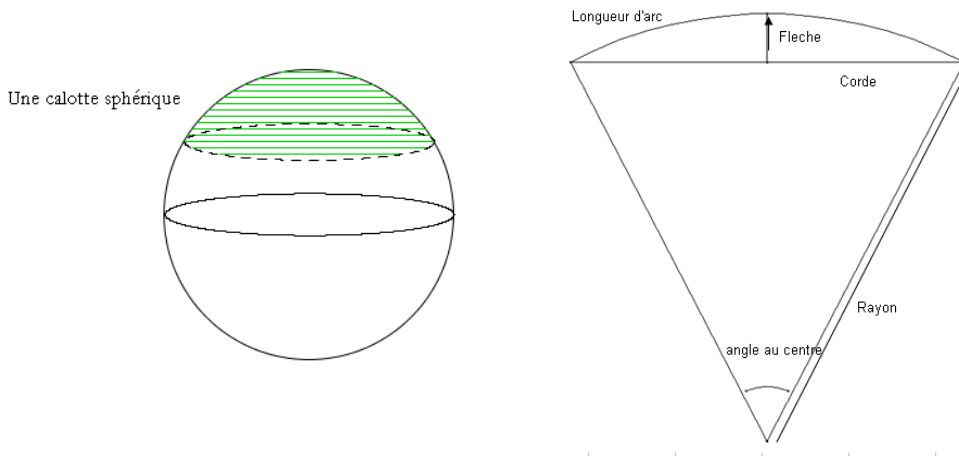


Figure B-3 : Mise en forme sphérique : définition des paramètres d'une calotte sphérique

Une calotte se caractérise par un rayon de courbure, une longueur d'arc, une flèche et un angle au centre. Le schéma de la Figure B-3 illustre ces paramètres. La description de cette calotte nécessite deux grandeurs ; nous parlerons donc de couples, typiquement la flèche ou le rayon complété de la longueur d'arc. Cette dernière dimension correspond dans notre cas à la taille du détecteur. Le plan est une surface définie par une longueur et une largeur ; la notion d'épaisseur interviendra plus loin dans ce chapitre.

Il apparaît clairement que le passage d'une forme à l'autre nécessite des déformations, obtenues en appliquant une contrainte. Avant d'estimer cette déformation mécanique, il est important de rappeler la définition des termes que je vais employer (François et al. 1993).

B.I.1.1 - Définitions mécaniques

B.I.1.1.1 - Contrainte et déformation

La contrainte σ caractérise l'état de sollicitation mécanique en tout point du matériau, indépendamment de sa nature et de ses caractéristiques de résistance. Elle se définit par le tenseur de contrainte. Sous l'action du chargement, d'après la loi de Hooke, le corps se déforme. On peut ainsi définir un champ de déplacement définissant le champ de déformation.

Pour illustrer simplement ces définitions, je vais considérer une contrainte uniaxiale (traction) sur un parallélépipède de section S . La contrainte σ est alors le rapport entre la force exercée et la surface. La déformation ε est le rapport entre l'élongation et la longueur initiale.

La loi de comportement du matériau lie la contrainte à la déformation. La courbe de la Figure B-4 présente deux domaines significatifs :

- élastique : la déformation est proportionnelle à la force appliquée (loi de Hooke) et la pente de cette droite est le module de Young E . La limite élastique est définie à la fin de ce domaine,
- plastique : la déformation est irréversible et tend vers la rupture du matériau obtenue pour une contrainte dite de rupture, notée σ_{rupture} .

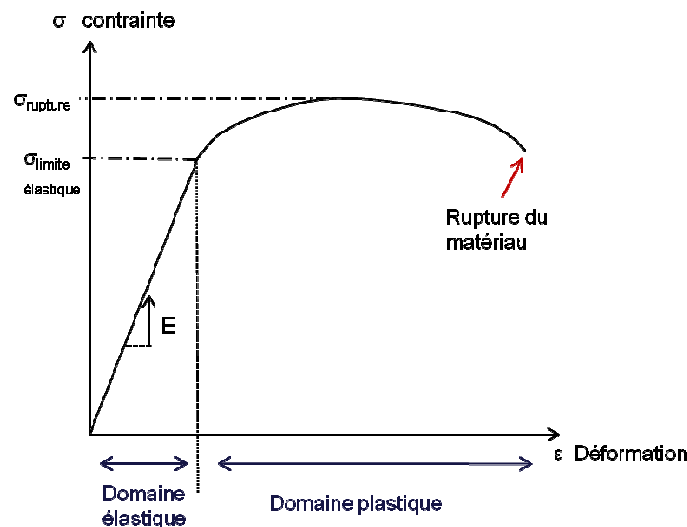


Figure B-4 : La déformation en fonction de la contrainte

En microélectronique, les matériaux sont caractérisés principalement par le premier domaine, leur rupture intervenant peu après leur limite élastique.

B.I.1.1.2 - Module de Young

Le module de Young est également appelé le module d'élasticité. Il se définit pour un matériau isotrope, comme la contrainte mécanique qu'il faudrait appliquer pour doubler la longueur du matériau ; il s'exprime en unité de pression, notée le plus souvent en GPa. Dans le cadre de matériaux anisotropes, l'élasticité est définie par les constantes de raideur C_{ij} définissant le module de Young selon une direction cristallographique $\{ijk\}$.

Les matériaux ayant un faible module de Young sont flexibles ; les déformations atteintes sont importantes pour de faibles contraintes appliquées. Par exemple le polyamide a un module de Young de 3 GPa à 5 GPa et les métaux souples comme l'aluminium ou l'or ont un module approximativement de 70 GPa (Bréchet 2005).

Au contraire, le silicium est rigide et son module est de l'ordre de la centaine de GPa. Du fait de son anisotropie (Chung & Buessem 1967), il varie selon les axes cristallographiques :

Directions cristallines	{111}	{100}		{110}	
		<011>	<001>	<111>	<001>
Modules de Young	168,9 GPa	168,9 GPa	130,2 GPa	187,5 GPa	130,2 GPa

Tableau B-1 : Modules de Young du silicium selon les axes cristallographiques (Brantley 1973)

Ce module évolue selon la pureté et le mode d'élaboration des tranches silicium. Ceux que nous allons considérer sont orientés (100) avec un module de Young égal à 130,2 GPa.

B.I.1.1.3 - Contrainte à la rupture

Reprenons l'exemple de la contrainte uniaxiale ; la loi de Hooke décrit la déformation dans l'axe 1 de la force appliquée :

$$\sigma_1 = \varepsilon_1 E$$

Équation B-1 : Contrainte uniaxiale

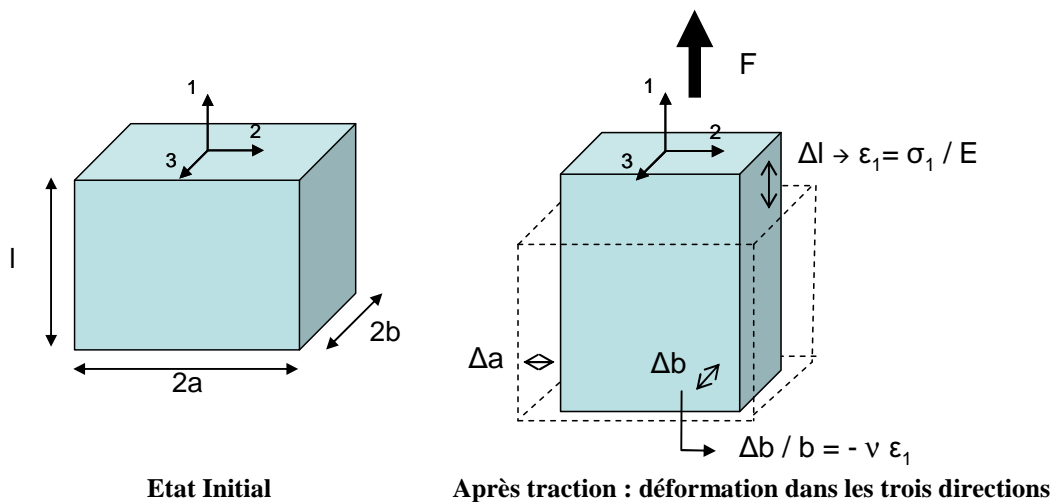


Figure B-5 : La déformation en fonction de la contrainte

Cette déformation dans l'axe s'accompagne d'une déformation dans les deux directions perpendiculaires à l'application de la force (axes 2 et 3) (Figure B-5). Cette variation relative des dimensions se décrit à partir de la déformation ε₁ par le coefficient de proportionnalité ν (sans unité) de Siméon-Denis Poisson.

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\nu \varepsilon_1 \quad \text{où } \nu : \text{coefficient de Poisson}$$

Équation B-2 : Déformations dans les deux directions perpendiculaires

Le signe de cette relation montre le rapport entre les déformations dans l'axe et les directions perpendiculaires. Si la déformation est une extension selon l'axe 1, les déformations dans les deux axes perpendiculaires sont en compression.

La déformation est possible jusqu'à une valeur critique. D'après Hooke, la déformation macroscopique est proportionnelle à la variation des distances interatomiques du matériau. Cette loi a été vérifiée par Norton et Loring grâce à des expériences de diffraction X (Thomas

1941). La limite de rupture est alors proportionnelle à l'étirement maximum des liaisons dans le matériau. L'énergie stockée lors de la déformation est telle que les liaisons se rompent. Cette limite est caractéristique de chaque matériau et de sa rigidité intrinsèque, qui dépend, dans les cas géométriques simples, de la surface, de la longueur et du module de Young.

La contrainte maximale avant rupture pour un silicium massif est estimée à 7 GPa (Petersen 1982). Néanmoins, selon le mode d'élaboration, la pureté et l'état de surface, cette limite varie. Un échantillon de silicium poli par un procédé mécano-chimique a une contrainte critique de 2 GPa à 3 GPa (Hu 1982), compte tenu des défauts cristallins introduits par le procédé. Ainsi, dans les prochains calculs, la contrainte critique de rupture (σ_{rupture}) du silicium sera estimée à 3 GPa.

B.I.1.2 - Calculs analytiques

Cette partie consiste à calculer géométriquement la déformation sphérique d'un échantillon plan de 10x10 mm² en une calotte sphérique.

Dans un premier temps, l'échantillon carré sera considéré par le cercle inscrit dans sa surface. Ce disque a une circonférence notée l_0 et un rayon r ; il est courbé en une calotte sphérique de rayon R (Figure B-6). Deux hypothèses peuvent être prises : soit la taille de l'échantillon r est constante, soit la circonférence du matériau est conservée. Ces deux conditions donnent les déformations respectivement tangentielle et radiale.

La déformation radiale est définie lorsque la circonférence est égale au périmètre plan ; elle est notée dans l'Équation B-3.

$$\text{disque plan : } l_0 = 2\pi r$$

$$\text{calotte sphérique : } 2\pi r = R\theta \Rightarrow \theta = 2r/R$$

$$\text{Or } r_{\text{calotte}} = c/2 = R \sin(\theta/2)$$

$$\text{D'où } l = 2\pi r_{\text{calotte}} = 2\pi R \sin(r/R)$$

$$\text{Comme } \varepsilon = \frac{l_0 - l}{l_0} \text{ on obtient :}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{R}{r} \sin\left(\frac{r}{R}\right)$$

Équation B-3 : Déformation radiale

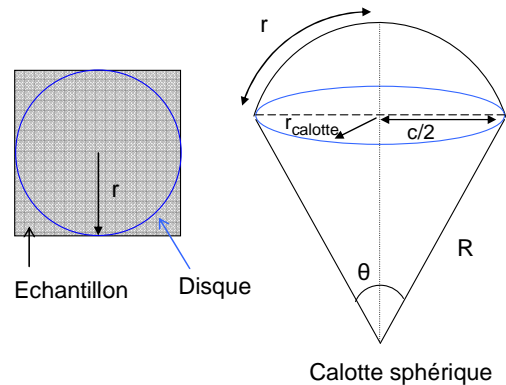


Figure B-6 : Disque et calotte sphérique

La déformation de l'échantillon est tracée en fonction du rayon R dans le graphe de la Figure B-7 b. Elle augmente lorsque le rayon de courbure diminue c'est-à-dire lorsque la courbure augmente (courbe bleue).

L'élongation maximale d'une plaque de silicium est calculée à partir de la contrainte de rupture fixée précédemment à 3 GPa :

$$\varepsilon_{critique} = \frac{\Delta l}{l_{critique}} \quad \text{or} \quad \sigma_{rupture} = E \varepsilon_{critique} \quad d'où \quad \varepsilon_{critique} = \frac{3 \cdot 10^9}{130,2 \cdot 10^9} = 2,30\%$$

Équation B-4 : Limite d'élasticité du silicium

La déformation critique est tracée en rose sur le graphe de la Figure B-7 b. Il apparaît qu'un carré de silicium de 10x10 mm² peut se courber jusqu'à des rayons de 13,4 mm. Cependant, cette valeur est idéale sachant que l'échantillon est un disque dans cette première approximation ; les coins de l'échantillon carré ne sont pas pris en compte.

Considérons dans un deuxième temps, le cercle de rayon r' circonscrit à l'échantillon carré (Figure B-7 a). La déformation radiale est tracée en jaune sur le graphe de la Figure B-7 b. Le rayon minimum, pour cette même déformation critique, est égal à 18,9 mm.

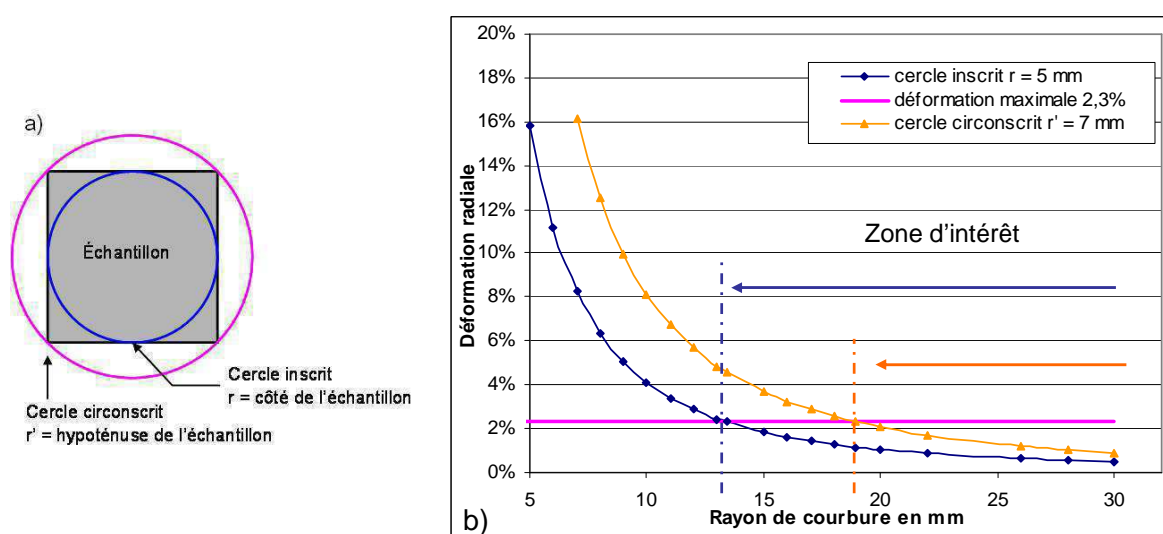


Figure B-7 : Déformation radiale en fonction du rayon de courbure – échantillon 10x10 mm²

L'influence de la taille et de la forme de l'échantillon est mise en évidence avec un calcul similaire mené sur des échantillons de 40x40 mm². Lorsque la taille de l'échantillon augmente, la courbe a la même tendance (Figure B-8). Cependant, le rayon de courbure minimum accessible, correspondant à l'élongation critique du carré de silicium, est plus grand et atteint 53,5 mm. En prenant en compte la déformation critique du cercle circonscrit, le rayon minimum augmente et atteint une valeur de 76 mm.

L'influence de la dimension de l'échantillon est importante : pour une longueur d'échantillon multipliée par quatre, les rayons accessibles sont également quadruplés.

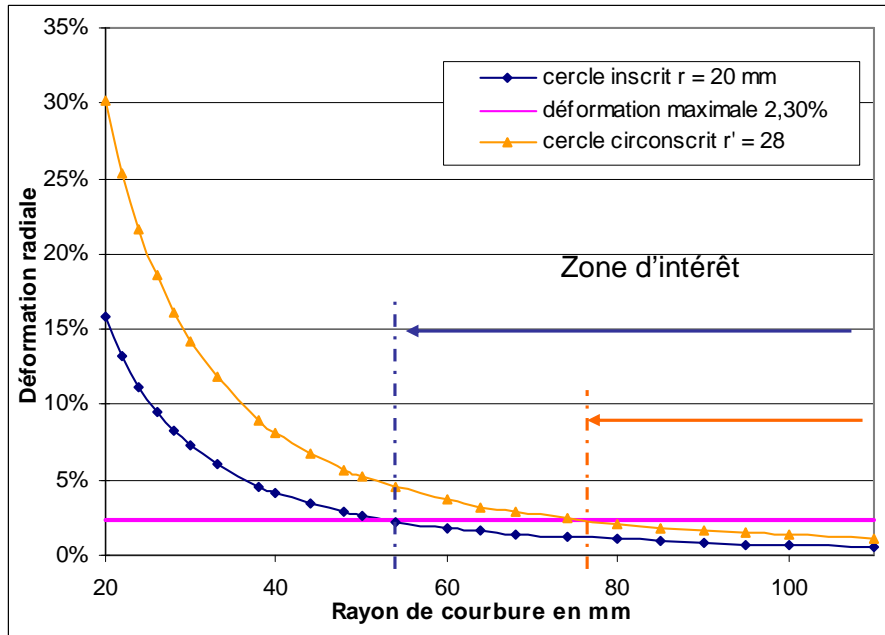


Figure B-8 : Déformation radiale en fonction du rayon de courbure – échantillon 40x40 mm²

Les calculs pour ces deux tailles d'échantillon, montrent qu'une structure de faible dimension se courbe sphériquement plus facilement. Ces calculs sont menés pour une contrainte à la rupture fixée, donc un état de surface déterminé par un procédé. Une contrainte critique plus faible, diminuerait d'autant plus ces valeurs. De plus, ces résultats ne prennent en compte que la déformation géométrique du carré et négligent l'épaisseur de la structure.

Pour prendre en compte ce paramètre, il faut se placer dans la théorie des plaques. Dans le modèle décrit par Love-Kirchhoff (Timoshenko & Woinowsky-Krieger 1961), le silicium est défini comme un matériau continu, homogène, dont l'épaisseur e est inférieure aux deux autres dimensions. On définit le plan moyen de l'échantillon dans lequel aucune déformation n'apparaît. Un essai de flexion permet de courber la structure avec un rayon R . Les plans supérieurs et inférieurs au plan moyen sont contraints. Pour une courbure convexe, les plans supérieurs sont en tension et les plans inférieurs sont en compression. Le schéma de la Figure B-9 illustre une coupe de la plaque courbée.

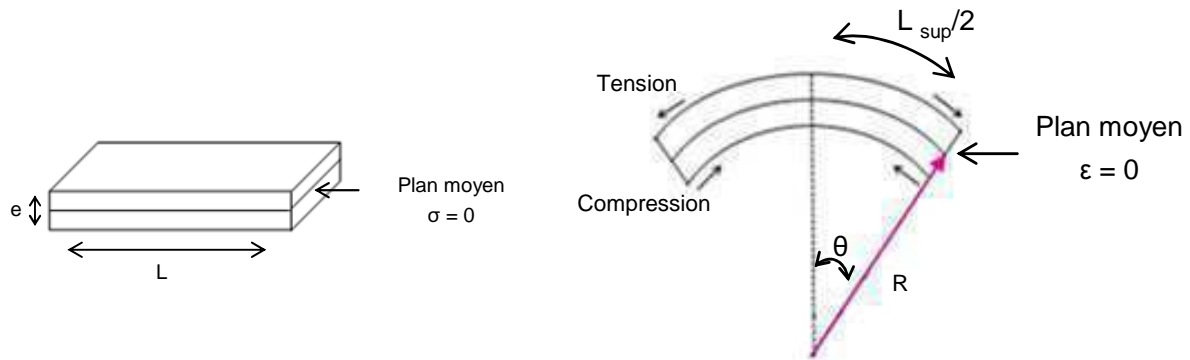


Figure B-9 : Déformation sphérique d'une plaque mince

B.I.1.3 - Influence de l'épaisseur

Dans l'hypothèse des plaques minces, le modèle de Kirchhoff considère que les sections normales au feuillet moyen restent normales lors de la déformation. Ainsi, la longueur d'arc du plan supérieur est étirée d'une grandeur proportionnelle à l'épaisseur (Équation B-5). La contrainte issue de cette déformation correspond à une contrainte de surface, la contrainte dans l'épaisseur étant supposée nulle. Les hypothèses des plaques minces négligent par contre les contraintes de compression.

$$L = R.\theta$$

$$\frac{L_{\text{sup}}}{2} = \left(R + \frac{e}{2}\right)\theta$$

$$d'où \varepsilon = \frac{e}{2R}$$

Équation B-5 : Déformation d'une plaque mince en flexion

	R = 40 mm	R = 50 mm	R = 60 mm	R = 80 mm	R = 100 mm
e = 20 μm	2,5 10 ⁻⁴	5,0 10 ⁻⁹	8,3 10 ⁻¹⁴	1,5 10 ⁻²³	1,5 10 ⁻²⁸
e = 50 μm	6,3 10 ⁻⁴	1,3 10 ⁻⁸	2,1 10 ⁻¹³	3,7 10 ⁻²³	3,7 10 ⁻²⁸
e = 100 μm	1,3 10 ⁻³	2,5 10 ⁻⁸	4,2 10 ⁻¹³	7,4 10 ⁻²³	7,4 10 ⁻²⁸
e = 500 μm	6,3 10 ⁻³	1,3 10 ⁻⁷	2,1 10 ⁻¹²	3,7 10 ⁻²²	3,7 10 ⁻²⁷

Tableau B-2 : Valeurs de déformation $\varepsilon = e/(2R)$

	R = 40 mm	R = 50 mm	R = 60 mm	R = 80 mm	R = 100 mm
e = 20 μm	3,3 10 ⁻⁷	6,5 10 ⁻²	1,1 10 ⁻²	1,9 10 ⁻¹²	1,9 10 ⁻¹⁷
e = 50 μm	8,1 10 ⁻⁷	1,6 10 ⁻³	2,7 10 ⁻²	4,8 10 ⁻¹²	4,8 10 ⁻¹⁷
e = 100 μm	1,6 10 ⁻⁸	3,3 10 ⁻³	5,4 10 ⁻²	9,7 10 ⁻¹²	9,7 10 ⁻¹⁷
e = 500 μm	8,1 10 ⁻⁸	1,6 10 ⁻⁴	2,7 10 ⁻¹	4,8 10 ⁻¹¹	4,8 10 ⁻¹⁶

Tableau B-3 : Valeurs de contrainte en Pa pour une tranche de silicium orienté <001> E=130 GPa (Brantley 1973)

Les valeurs de déformation et de contrainte sont données dans les Tableau B-2 et Tableau B-3 selon l'épaisseur et le rayon de courbure. La déformation augmente lorsque le rayon de courbure diminue ou que l'épaisseur augmente. Pour accéder à des rayons de 50 mm, la déformation est faible, inférieure à 10⁻⁶ %. Seule la courbure à 40 mm de rayon, présente des déformations importantes ; notamment la courbure d'un échantillon massif à 500 μm nécessite une déformation proche de 1 %, qui est usuellement considérée comme une valeur limite pour les matériaux rigides en microélectronique.

Le tableau des contraintes montre la même influence avec ces paramètres. Les contraintes de surface calculées pour les rayons supérieurs à 50 mm, sont inférieures à la contrainte de rupture du silicium, qui a été fixée à 3 GPa.

D'après ces calculs, un échantillon de silicium massif de 500 μm d'épaisseur pourrait être courbé à des rayons de 80 mm, ce qui n'est pas expérimentalement réalisable. En effet, cette étude est faite avec les hypothèses des plaques minces ; les contraintes de cisaillement ne sont pas prises en compte. Or, avec l'augmentation de l'épaisseur, ces contraintes ne peuvent plus

être négligées. Ces résultats sont donc optimistes ; un modèle plus juste consisterait à prendre en compte les grandes déformations. Ce modèle serait effectivement plus adapté étant donné que les courbures recherchées impliquent une flèche (déplacement hors axe) supérieur à l'épaisseur de l'échantillon. Avec cette hypothèse, le domaine de courbure des échantillons de silicium devrait être restreint.

Malgré les approximations importantes du calcul analytique supra, l'avantage de l'amincissement sur la facilité de courbure est mis en évidence. Cette influence a été vérifiée expérimentalement par la courbure convexe de trois épaisseurs de puces de silicium (30 μm , 67 μm et 97 μm), et de surface variant de 100 mm² à 500 mm². Deux phénomènes, qui se comprennent intuitivement, ont ainsi été mis en évidence :

- pour une épaisseur fixée, le rayon de courbure accessible augmente avec la surface,
- pour une surface fixée, le rayon de courbure diminue avec l'épaisseur.

Ainsi, les fortes courbures sont atteintes en diminuant la surface ou l'épaisseur de l'échantillon. Par conséquent, il existe deux solutions de mise en forme sphérique. La première solution consiste à structurer le composant grand format en petites structures, et la deuxième, à diminuer l'épaisseur du matériau.

La partie suivante va permettre d'évaluer ces deux solutions en envisageant les différentes techniques de mise en œuvre.

B.I.2 - La courbure par une structuration du composant

La première technique de courbure consiste à donner au composant une géométrie particulière afin de diminuer la contrainte lors de la mise en forme sphérique.

B.I.2.1 - Structures en triangle type projection de Fuller

Une solution originale (Street et al. 2009) consiste à copier la projection de Fuller des cartographes (Figure B-10). Le plan focal est structuré en cinq grands triangles composés de 12 000 pixels actifs qui sont fabriqués sur un support flexible en polymère. Les pixels sont constitués d'une diode et d'un transistor. Les pixels sont adressés par les lignes parcourant les triangles (Figure B-10 a) Les sommets des triangles forment le centre du plan focal et leurs bases sont distinctes d'un angle déterminé, formant un trou entre les zones actives. Ce système a été courbé à un rayon de 30 mm ; la courbure rapproche les bases des triangles et le plan focal forme alors un dôme (Figure B-10 b).

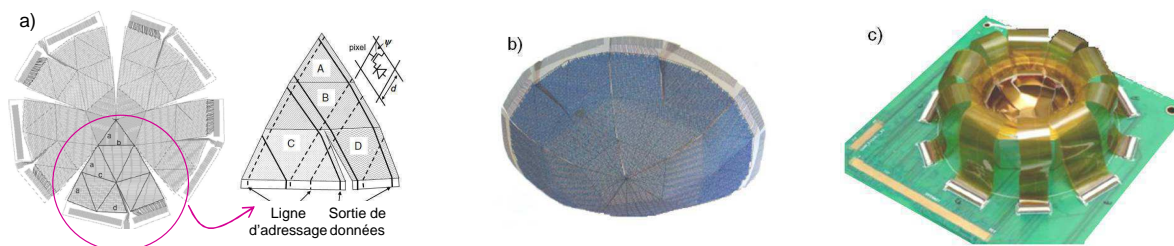


Figure B-10 : Solution de courbure proposée par Street, Wong, Lujan et al

a) Découpe en triangles et agrandissement de la structure d'un triangle ; b) Mise en forme sphérique ;

c) Intégration pour test électrique

Les solutions techniques les plus répandues consistent à diviser le composant en sous-éléments actifs plans fabriqués sur un substrat polymère déformable. Les groupes sont dissociés par une gravure formant ainsi des îles de matériau interconnectées par une métallisation d'or. Ces architectures sont utilisées dans l'électronique souple pour donner de la flexibilité aux circuits à base de transistors (Lacour et al. 2005) (Hsu et al. 2002) ; ces travaux adressent les applications biomédicales, et grand public comme les électro-textiles (John A. Rogers et al. 2010).

B.I.2.2 - Avantage des petites structures

L'avantage de courber plusieurs éléments de faible taille plutôt qu'un seul grand élément, est évalué par le calcul de la flèche liée à la courbure. Elle correspond à la déformation hors du plan initial de l'échantillon et caractérise donc la difficulté à courber l'élément. En effet, si la flèche est faible, voire nulle, alors la longueur d'arc est égale à la dimension plane de l'échantillon, qui est donc très peu déformé par la courbure.

Les matériaux de microélectronique acceptent une flèche non nulle ; en effet, bien que les composants soient réalisés sur des tranches planes, les étapes de micro-technologie courbent le substrat : c'est ce qu'on appelle la voilure. La flèche liée à cette voilure est typiquement de 20 μm à 30 μm pour un substrat de diamètre 200 mm. Proportionnellement, la flèche critique est de 1 μm pour les échantillons de 10x10 mm². Cette valeur sera ramenée à 10 μm afin de correspondre aux critères de planéité de l'astronomie (O'Connor et al. 2007).

Un composant de taille 10x10 mm² courbé à un rayon de 60 mm présente une flèche de 208 μm . Si ce composant est divisé en sous-éléments de longueur inférieure, alors la flèche liée à la courbure de ces sous-éléments est faible, comme le présente le tableau ci-dessous (Tableau B-4). D'après les critères précédents, la structure facilitant la courbure à un rayon de 60 mm est obtenue avec des sous-éléments inférieurs à 2 mm.

Lorsque le rayon de courbure diminue, la taille du sous-élément doit être diminuée. Pour des rayons de 30 mm, les sous-éléments seront de 1 mm.

Rayon de courbure	Taille	Flèche
60 mm	Composant de 10mm	208 μm
60 mm	Sous-élément de 1 mm	2 μm
60 mm	Sous-élément de 2 mm	8 μm
60 mm	Sous-élément de 3 mm	19 μm
30 mm	Composant de 10mm	416 μm
30 mm	Sous-élément de 1 mm	4 μm
30 mm	Sous-élément de 2 mm	17 μm

Tableau B-4 : Influence de la taille sur l'effort de courbure mesuré par la flèche

Chaque sous-élément courbé à 60 mm, forme des surfaces tangentes à la courbure totale de même rayon. Le schéma de la Figure B-11 montre cette structure courbée.

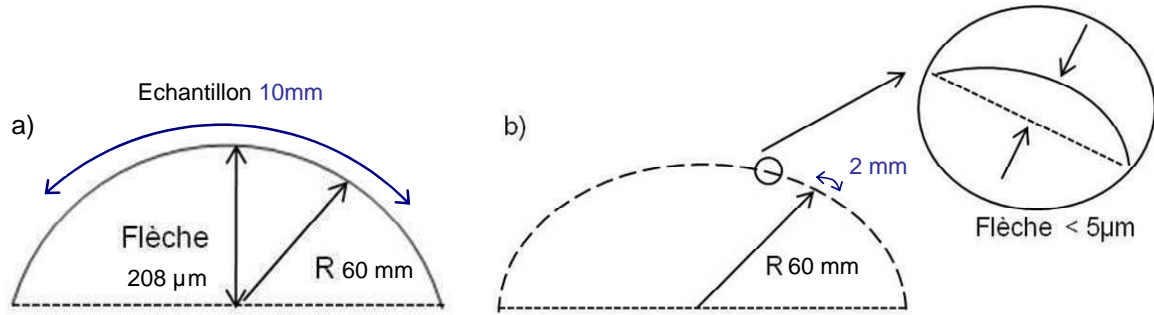


Figure B-11: Courbure d'un échantillon grand format sous un rayon R de 60 mm
Courbure pleine plaque (a) et courbure en groupes de pixels (b)

La structure en groupes de pixels permet donc d'obtenir de plus fortes courbures ou de travailler sur de plus large format de composants.

B.I.2.3 - Etat de l'art

Par cette structure, la contrainte est déportée hors des groupes actifs (Hsu 2004) et la déformation est principalement localisée dans les interconnexions entre cellules élémentaires. De nombreuses études portent sur la forme et la structure à donner à ces interconnexions (Gonzalez et al. 2008). Il existe néanmoins une valeur critique au-delà de laquelle les îles peuvent se fissurer ou se désolidariser du substrat. Pour gagner en flexibilité ou augmenter la taille des groupes, ces systèmes sont souvent enrobés de polymère. Les travaux de Yoon et al (Yoon et al. 2007) montrent que l'encapsulation réduit la contrainte de cisaillement à l'interface substrat-île lors d'une tension uniaxiale. L'objectif de cet enrobage est de déplacer le plan neutre dans une zone hors de la couche active afin de diminuer le risque de fissuration du système ; les bords sont contraints par le polymère et le déplacement des défauts cristallins est limité.

B.I.2.3.1 - Système ultra-flexible

Les travaux de la référence (D.-H. Kim et al. 2008) illustrent bien ces systèmes ultra-flexibles basés sur l'enrobage (Figure B-12 a). Le circuit CMOS est fabriqué sur un substrat temporaire de silicium constitué d'une bicouche de polymère : un polyamide et une couche de PMMA (Poly(méthyl méthacrylate)). Par un procédé de transfert, la surface est fonctionnalisée (MOSFET sur une île de $200 \times 300 \mu\text{m}^2$). Les gravures plasma puis chimique permettent de libérer la structure qui présente alors une épaisseur de $1,7 \mu\text{m}$ sur le substrat de polyamide restant. Ces circuits ultrafins peuvent être enroulés autour d'une tige de 2 mm de diamètre, comme le montre la photo de la Figure B-12.

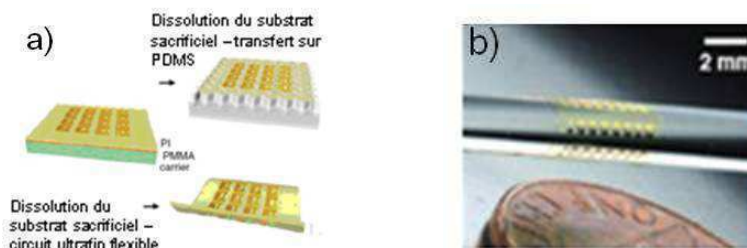


Figure B-12 : Electronique souple – Procédé de Kim et al

B.I.2.3.2 - Mise en forme hémisphérique

Seules trois publications se démarquent de ces travaux d'électronique souple, et adressent spécifiquement la mise en forme sphérique du détecteur. Ces travaux utilisent une structuration du composant sur substrat silicium.

Dinyari et al. (Dinyari et al. 2008), propose un plan focal courbe à partir d'un substrat SOI (Silicium sur Isolant). La structure en îles est fabriquée par des gravures profondes au travers du substrat qui permettent de dissocier les sous-circuits (Figure B-13 a). L'interconnexion entre îles de matériaux est réalisée par dépôt métallique sur le silicium gravé, qui forme alors un ensemble de ressorts (Figure B-13 b). Un traitement chimique permet de libérer les sous-circuits du substrat silicium, qui sont alors reliés uniquement par de fines lignes métallisées. Le système est transféré par capillarité sur une membrane en latex permettant ainsi d'accéder à une forte flexibilité (Figure B-13 c). La courbure sphérique de ce système permet de mettre en évidence la déformation des interconnexions. L'écart entre les sous-éléments varie selon la position sur la calotte sphérique, comme vérifié dans l'électronique souple (S. Wang et al. 2009). Le facteur de remplissage du composant courbé varie selon la position des circuits sur le dôme ; au centre, le facteur de remplissage est de 30 %, et atteint 75 % en périphérie. Ces travaux ne présentent pas de photodétecteurs fonctionnels avec cette architecture courbée à 10 mm ; il ne s'agit que d'une démonstration mécanique.

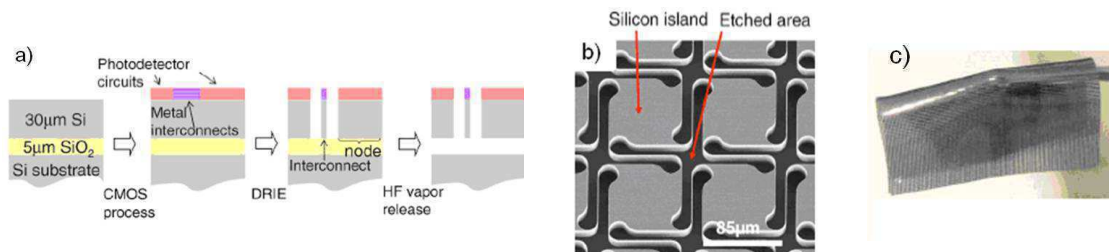


Figure B-13 : Mise en forme sphérique par le procédé de la référence Dinyari et al
a) Procédé de courbure ; b) Interconnexions ; c) Composant aminci sur une pince

Les travaux de Wang (L. Wang & Ast 2003) montrent une puce de silicium structuré en petits carrés de 10x10 mm² par gravure sèche (Figure B-14). Le procédé de courbure consiste à coller sur un substrat courbé ce composant, en exerçant une force sur la structure. La périphérie est libre de se déformer pour suivre la courbure. Des rayons de 78 mm et 140 mm ont été obtenus. L'influence de la taille des groupes sur la capacité à se courber et sur le taux de remplissage est également mise en évidence, mais l'objectif est de minimiser les écarts entre groupes pour diminuer ces zones inactives. L'augmentation de l'épaisseur des interconnexions (de 0,13 µm à 45 µm) permet de rigidifier le contact entre les groupes de pixels ; ces zones sont effectivement les lieux de contraintes maximales et doivent être structurées pour les supporter.

Les conditions aux limites de cette solution de mise en forme sphérique influent sur le comportement du composant et les valeurs de contrainte. Lorsque la périphérie glisse sur le support, le centre est comprimé alors que la périphérie est étirée. Lorsque le composant est libre de se déplacer, le centre et la périphérie sont étirés.

Là également, il s'agit d'une analyse mécanique du comportement de la structure ; aucune réalisation fonctionnelle n'a été présentée.

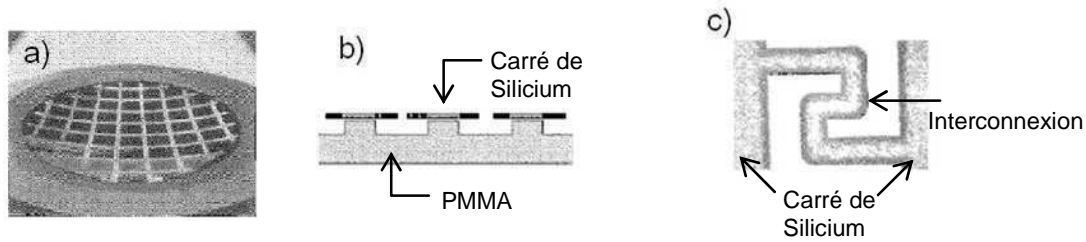


Figure B-14 : Solution proposée par Wang et al

a) Composant structuré ; b) Vue en coupe ; c) Interconnexion dans le plan du détecteur (vue de dessus)

Ko et al. (Ko et al. 2008) ont réalisé, quant à eux, une caméra hémisphérique fonctionnelle qui utilise des îlots de zones actives et une interconnexion métallisée (Figure B-15). Par un procédé conventionnel, le substrat SOI est fonctionnalisé, afin de réaliser une matrice de 16x16 pixels (Figure B-15 a). Chaque élément composé d'une photodiode, a une surface de $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ et une épaisseur de $1,2 \mu\text{m}$. Le système est encapsulé par du polyamide. Les interconnexions sont de fines bandes métalliques chrome/or/chrome ($360 \times 50 \mu\text{m}^2$ d'une épaisseur de $156 \mu\text{m}$) qui absorbent les déformations, et ondulent sous la contrainte. La gravure chimique permet de libérer les différents systèmes optoélectroniques plans qui sont interconnectés mécaniquement et électriquement par des lignes métalliques. Cette structure est transférée sur une demi-sphère en polydiméthylsiloxane (PDMS). La matrice est déposée par capillarité sur ce dôme élastomère radialement étiré. Le relâchement de la contrainte permet de déformer la matrice essentiellement par compression ; le rayon de courbure est fixé à 10mm. Ce système hémisphérique est collé sur un substrat en verre et reporté sur un circuit imprimé pour être caractérisé.

Cette publication est la première caméra hémisphérique visible avec un angle de vue de 90° , où la rétine de détection est courbe, mais constituée de 16x16 pixels distincts (Figure B-15 b et c).

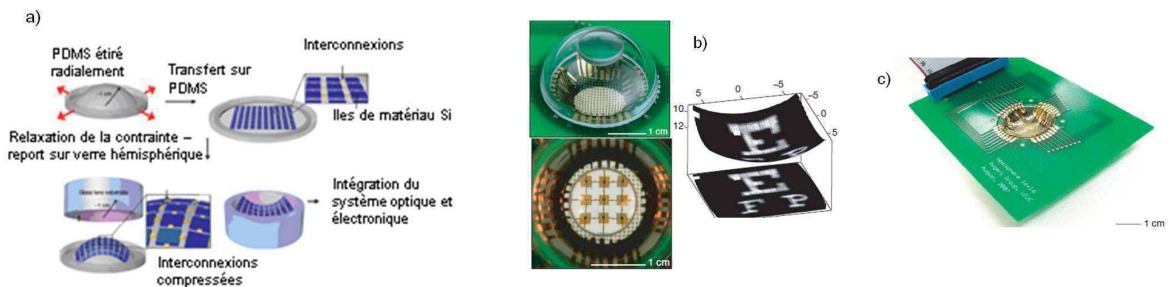


Figure B-15 : Caméra hémisphérique réalisée par Ko et al

a) Procédé de courbure ; b) Agrandissement de la caméra et image obtenue ; c) Module intégré

Courbure par structuration en groupes de pixels

La structure en îles de matériaux permet de courber fortement les composants. Inspirés des travaux en électronique souple, les paramètres importants retenus sont la taille des groupes, la forme et l'épaisseur des interconnexions. Une encapsulation de polymère permet d'améliorer la flexibilité. Les trois solutions qui portent sur une mise en forme sphérique couvrent des rayons de courbure de 10 mm à 78 mm. Néanmoins, la courbure est obtenue au détriment du taux de remplissage du détecteur, qui varie dans le champ. Ce facteur est fortement dégradé par la taille des interconnexions et par la diminution du nombre de pixels du composant. Ces architectures nécessitent également le câblage de chaque élément du circuit, ce qui représente un effort d'ingénierie considérable et un retour en arrière par rapport aux techniques actuelles d'assemblage des composants. En effet, les pixels sont connectés à un circuit de type CMOS assurant le multiplexage ; cette structure matricielle permet de diminuer le nombre de connexions à réaliser et ainsi gagner en encombrement système et en simplification de câblage.

La courbure par structuration en groupes de pixels s'adresse donc à des applications où le nombre de pixels est faible, et où la résolution n'est pas un critère primordial.

B.I.3 - Courbure pleine plaque

Les techniques de courbure précédentes nécessitent de modifier le procédé et l'architecture des composants. La deuxième technique de mise en forme sphérique est la courbure de tout le composant : « courbure pleine puce ». Cette solution est compatible avec des composants sur étagère, c'est-à-dire sans modifier le procédé de fabrication, en travaillant en bout de chaîne et permet la conservation du taux de remplissage maximum. A la lueur des tendances mises en évidence par les calculs analytiques, les solutions de mise en forme hémisphérique des composants vont être étudiées par amincissement, complet ou partiel.

B.I.3.1 - Amincissement partiel

J'ai participé à un dépôt de brevet sur une technique d'amincissement partiel du substrat. La structure est réalisée en face arrière du composant épais pour faciliter la courbure (Fendler & Dumas 2011). Cette structure est une gravure de profils triangulaires qui permettent de conserver l'épaisseur du composant tout en amincissant certaines zones. La courbure est obtenue par le rapprochement des profils de gravure (Figure B-16).

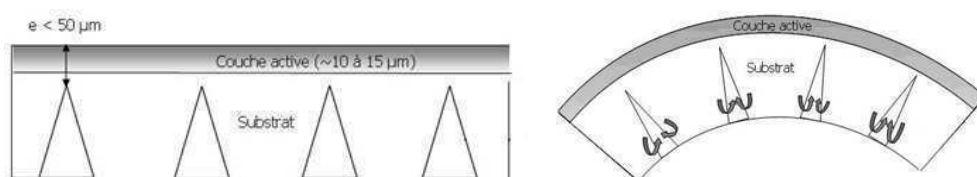


Figure B-16 : Courbure par structuration de la face arrière
Le substrat est gravé avec des profils triangulaires ; lors de la courbure, les faces se rapprochent.

Certaines équipes de recherche pratiquent également un amincissement partiel de la structure (Swain 2004) (Figure B-17). Le composant est aminci au centre et un contour rigide est conservé pour une meilleure manipulation. D'autres procèdent à l'amincissement de l'ensemble du composant (Nikzad et al. 2003).

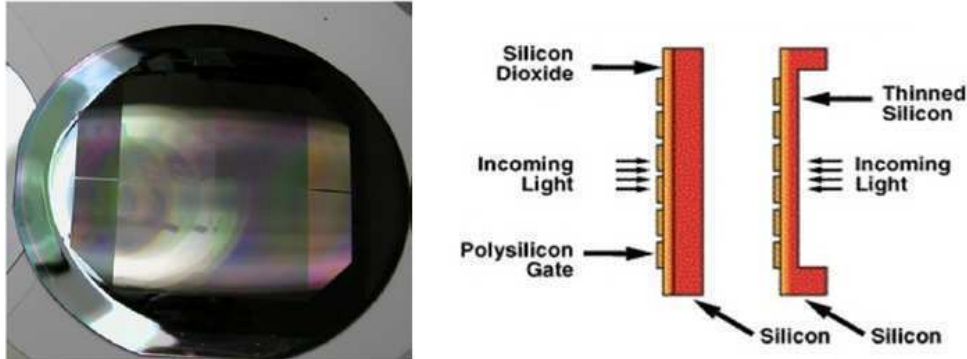


Figure B-17 : Amincissement partiel de structure réalisée par Swain et al

Les progrès de la microélectronique dans ce domaine ont permis l'avènement de nouvelles structures de type SIP (Silicon In Package) constituées de puces amincies empilées (K. M. Brown 2004) (Karnezos & Pendse 2005).

Deux techniques de mise en œuvre de la forme sphérique, exploitant le travail sur l'épaisseur, vont être étudiées.

B.I.3.2 - Courbure par la réalisation d'un bilame

La première solution que nous allons explorer est la réalisation d'un bilame qui est l'assemblage de matériaux dont les propriétés mécaniques diffèrent. Lors de la fabrication, l'écart des coefficients de dilatation et les températures de dépôt créent des contraintes qui déforment le composant. Le résultat est une voilure de la structure.

En microélectronique, cet effet est un artefact lié aux étapes de micro-technologie où la fonctionnalisation des composants est obtenue par le dépôt de couches minces sur le substrat. Par exemple, le dépôt d'un film d'aluminium de 1 μm d'épaisseur sur une tranche de silicium de 200 mm de diamètre et 500 μm d'épaisseur, crée une voilure de 120 m de rayon de courbure (Freund & Suresh 2004), soit une flèche de 42 μm .

Une technique de mise en forme sphérique consisterait donc à utiliser ce résultat. On déposerait sur le composant un film mince, dont les propriétés thermoélastiques permettent d'obtenir une courbure au rayon approprié. La déformation du substrat par le dépôt d'un film mince (Stoney 1909) est donnée par la formule de Stoney (Équation B-6).

$$C = 6 \cdot \frac{M_f h_f}{M_s h_s^2} (\alpha_f - \alpha_s) (T - T_0)$$

Équation B-6 : Formule de Stoney

Cette formule prend pour hypothèse que l'épaisseur du film est inférieure à celle du substrat. La courbure C dépend des paramètres mécaniques suivants :

- l'épaisseur h ,
- les modules biaxiaux M , dépendant du module de Young et du coefficient de Poisson,
- le coefficient de dilatation thermique α ,
- la température T .

Les indices s et f font référence respectivement au substrat et au film

D'après la formule, les fortes courbures sont obtenues pour des matériaux à fort contraste de coefficient de dilatation thermique (CDT) et pour des épaisseurs de films importantes ; la température du dépôt influe également sur la courbure. Pour le raisonnement, deux températures de dépôt sont prises en compte :

- 150°C : température typique de dépôt en couche mince (PVD)
- 400°C : température maximale que peut supporter un circuit CMOS sans être dégradé (diffusion des dopants (Grove 1967)).

Les coefficients de dilatation thermiques sont pris au premier ordre et sont donc indépendants de la température.

Les épaisseurs déposées par les techniques de dépôt sont généralement faibles, de l'ordre du micromètre. Pour un dépôt à une température de 150°C, une couche de SiO₂ de 1 µm sur un échantillon de 10x10 mm², permet de courber le substrat de silicium de 50 µm d'épaisseur, à un rayon de 2 m ; tandis qu'une épaisseur de 5 µm permet d'accéder à un rayon de 477 mm. Ces courbures ne sont pas suffisantes pour adresser les applications visées par la thèse, dont les rayons de courbure varient entre 40 mm et 50 mm pour les applications militaires.

Pour augmenter la courbure, l'épaisseur du film doit être augmentée. Dans ce cas, la formule de Stoney n'est plus vérifiée ; il faut utiliser l'Équation B-7 qui ne fait aucune approximation sur l'épaisseur du film.

$$C = \frac{6 \cdot \frac{M_f h_f}{M_s h_s^2} (\alpha_f - \alpha_s) (T - T_0) \left(1 + \frac{h_f}{h_s}\right)}{1 + 4 \frac{M_f h_f}{M_s h_s} + 6 \frac{M_f h_f^2}{M_s h_s^2} + 4 \frac{M_f h_f^3}{M_s h_s^3} + \frac{M_f^2 h_f^4}{M_s^2 h_s^4}}$$

Équation B-7 : Expression de la courbure en fonction des paramètres mécaniques

Le graphe de la Figure B-18 montre l'évolution de la courbure en fonction de l'épaisseur du film pour les deux températures (400°C et 150°C). L'étude est menée sur un substrat de 50 µm d'épaisseur.

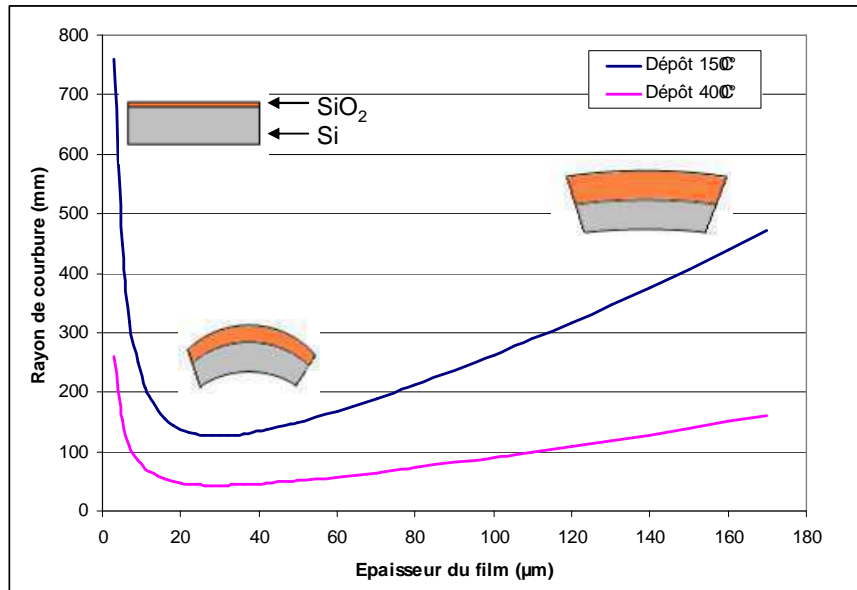


Figure B-18 : Evolution du rayon de courbure avec l'épaisseur de SiO_2 aux deux températures de dépôts

Ce graphe montre que pour les deux températures, le rayon de courbure atteint un minimum et augmente à nouveau lorsque l'épaisseur déposée tend vers l'infini. Ce minimum est obtenu pour une épaisseur de $30\ \mu\text{m}$ de SiO_2 déposée sur le substrat de silicium. Le rayon de courbure est de 43 mm pour un dépôt à 400°C , et de 126 mm pour un dépôt à 150°C . Le rayon de 43 mm peut répondre au cahier des charges de la thèse mais l'épaisseur n'est technologiquement pas réalisable. Elle nécessite un temps de dépôt important et l'échauffement induit par ce long procédé risquerait de dégrader le comportement électrique du composant. De plus, une forte épaisseur serait difficile à contrôler en homogénéité sur la surface.

Technologiquement, cette solution est donc difficilement transférable aux détecteurs. En effet, soit la courbure est trop faible pour répondre au cahier des charges, soit l'épaisseur à déposer n'est pas technologiquement envisageable. Cette technique pourrait être envisagée pour des applications d'astronomie où la courbure recherchée est faible (rayon typique autour de 300 mm) ; cependant, l'homogénéité du dépôt sur les larges plans focaux serait une difficulté technologique supplémentaire. Cette technique est également limitée par les températures et les matériaux qui peuvent être utilisés.

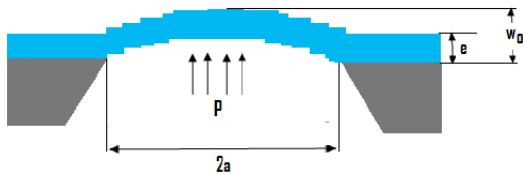
L'objectif est de trouver une mise en forme sphérique d'un composant déjà fonctionnalisé. Le critère principal du procédé est donc la conservation du fonctionnement électrique des couches actives du circuit, ce qui élimine les procédés à fortes températures.

B.I.3.3 - Courbure par l'amincissement du composant

Une deuxième solution consiste à mettre à profit l'amincissement du substrat pour courber le composant. Une approche empirique a été développée en début de chapitre (B.I.1.3 - 65). Différentes techniques de mise en forme sphérique existent, qui varient notamment par l'application de la force et les conditions aux bords.

Cette solution de courbure se rapproche dans l'état de l'art, des tests de gonflement de membrane ou « bulge test ». Cet essai mécanique permet d'évaluer les propriétés mécaniques des films en couches minces (Alaca et al. 2011). Le principe consiste à appliquer une pression

P hydrostatique sur une membrane, et la déflexion du matériau (notée w) est mesurée par interférométrie (Bonnotte et al. 2011) ou profilométrie optique (Hicham Youssef & André Ferrand 2011). Les conditions aux limites sont définies par un encastrement de la membrane. Sous l'effet de la pression, la membrane se déforme de façon non linéaire. La mesure des champs de déplacement permet de déterminer la déflexion et d'après les relations avec la pression, les paramètres mécaniques peuvent être déterminés (H. Youssef, A. Ferrand, Calmon, et al. 2010) (Équation B-8).



$$P = C_1 \frac{e \cdot \sigma}{a^2} \cdot w_0 + C_2(\nu) \cdot \frac{e \cdot E}{a^4 \cdot (1 - \nu)} \cdot w_0^3$$

Figure B-19 : Test de gonflement de membrane

Équation B-8 : Expression de la déflexion w en fonction de la pression P

Dans le cas d'une membrane carré, la relation est proportionnelle au cube des déplacements hors plan. Pour des échantillons de silicium de $800 \times 800 \mu\text{m}^2$ et $5 \mu\text{m}$ d'épaisseur (H. Youssef, A. Ferrand, Pons, et al. 2010), la déflexion maximale atteint $14 \mu\text{m}$ pour des pressions de $0,2 \text{ MPa}$.

L'équipe de JPL (Nikzad et al. 2007) propose un système très proche du gonflement de membranes (Figure B-19). Cette équipe a réalisé des essais sur des composants amincis. Le test est principalement mécanique. Il apparaît que la surface n'est pas parfaite ; seul le centre de l'échantillon est bien courbé, la périphérie de l'échantillon étant déformée par les conditions aux bords. La périphérie encastree est figée ; aucun déplacement dans les trois dimensions n'est autorisé. Or la mise en forme sphérique nécessite un degré de liberté sur la périphérie pour adapter la courbure. La Figure B-20 présente la déformation de la périphérie inhérente à cette technique.

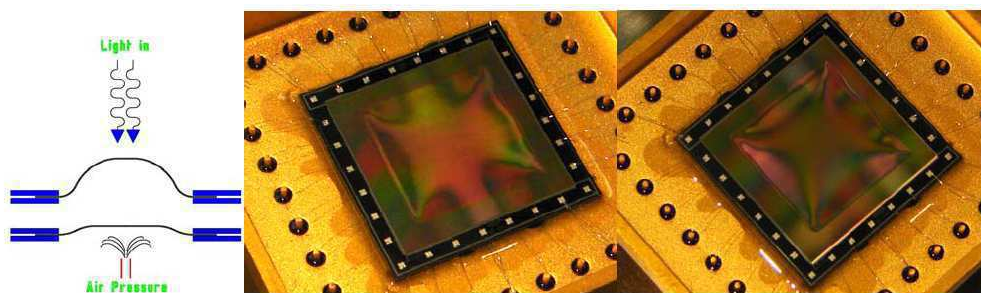


Figure B-20 : Mise en forme hémisphérique par le procédé développé par JPL

L'adaptation de ce test permet la mise en forme sphérique. La faisabilité a été démontrée ; les courbures concave et convexe sont réalisables mais la surface parfaitement sphérique n'est obtenue qu'au centre de l'échantillon. Les courbures sont faibles et liées au contrôle de la pression appliquée. De plus, le maintien du composant tend à diminuer la surface parfaitement sphérique de l'échantillon. La courbure n'est pas permanente et ne permet pas le transfert sur

des systèmes isolés. Cette solution ne peut donc pas répondre à notre problématique de courbure.

Les deux critères, surface sphérique parfaite et conservation de la courbure, ont défini le cahier des charges du procédé de courbure qui a été développé dans ma thèse.

D'un plan en une calotte sphérique

Le passage d'une surface plane en une calotte sphérique nécessite d'étirer le composant. L'enjeu est de le déformer sans le contraindre au delà de la limite critique du matériau.

Pour cela, deux techniques permettent de courber la structure. La première consiste à réaliser des sous-groupes de matériaux reliés par des interconnexions métalliques. La contrainte est ainsi reportée hors de la surface active, déformant les interconnexions. Etant donné que ces interconnexions sont fines et souples, la courbure est possible. Cette architecture a l'avantage de courber fortement le composant, mais l'inconvénient est une diminution du taux de remplissage du détecteur. De plus, elle nécessite un effort d'ingénierie pour interconnecter chaque sous-groupe.

La deuxième solution consiste à diminuer l'épaisseur de l'échantillon. L'amincissement permet de diminuer la contrainte dans le matériau, et d'accéder ainsi à de plus fortes courbures. Cette solution a le mérite de conserver le taux de remplissage du détecteur et de ne pas modifier le procédé de fabrication des composants. La courbure pleine puce peut être obtenue, soit par dépôt d'une couche mince sur l'échantillon (réalisation d'un bilame), soit par l'application d'une force uniforme sur la surface. Pour ces deux solutions, les courbures obtenues ne sont pas suffisantes pour les applications visées. De plus, les conditions expérimentales ne permettent pas le transfert de ces procédés sur les détecteurs infrarouge.

Loin des a priori, notre audace a été de mettre en forme des composants amincis de silicium par un effort mécanique. La partie suivante va détailler le procédé de courbure ainsi développé.

B.II - Développement du procédé de courbure

La courbure du plan focal a des avantages particulièrement intéressants dans la conception optique des systèmes miniatures et à large champ. Le chapitre précédent a mis en évidence deux applications des détecteurs courbes :

- la correction d'aberration de courbure de champ où la courbure du détecteur est majoritairement concave et les rayons nécessaires varient entre 40 mm et 130 mm.
- la miniaturisation par le biomimétisme des yeux d'insecte où la courbure est forte et en convexe.

La solution consiste à structurer le détecteur en groupes de pixels. Une solution de ce type sera développée lors de la courbure de détecteurs infrarouge refroidis dans le prochain chapitre.

L'application qui nous intéresse principalement est la suppression des effets de l'aberration de courbure de champ. L'objectif de cette thèse est de courber un détecteur sans altérer ses fonctionnalités électriques. Deux exigences dicteront nos choix :

- préserver la zone active du détecteur,
- conserver l'aspect final du composant grâce à une intégration standard.

Ce chapitre sera consacré au procédé de courbure développé au cours de ma thèse. La mise au point du procédé sera présentée dans la première partie et les résultats de courbure seront évalués dans la deuxième et troisième partie.

B.II.1 - Mise en forme sphérique du composant

Mes travaux de thèse ont été réalisés sur des détecteurs infrarouge de type TV/4 standard. Conformément à nos exigences, ni la structure du détecteur ni les étapes de mise en boîtier ne doivent être modifiées pour le procédé de courbure. Le fait d'utiliser un composant sur étagère garantit une partie de ces exigences.

B.II.1.1 - Description du procédé de courbure

Le critère majeur, qui a dicté le développement du procédé de courbure, est le mode de conservation de la forme sphérique. En effet, la courbure d'échantillons de silicium aux faibles épaisseurs exploite le domaine élastique du matériau ; par conséquent, la déformation n'est pas conservée après le relâchement de la force appliquée. Le choix s'est porté vers le collage de l'échantillon aminci sur un support courbe, facilitant ainsi la manipulation du circuit. Cet ensemble peut alors être intégré comme un composant standard.

Les supports sont des verres de montre de chimie. Ce sont des coupelles de 2 mm d'épaisseur qui répondent à notre cahier des charges :

- l'accès à différents rayons de courbure,
- l'accès aux courbures concave et convexe,
- une surface uniforme en rayon.

Le procédé de courbure est schématisé à la Figure B-21. Une pression est appliquée sur l'échantillon afin de contraindre le composant à épouser la forme hémisphérique du support. La forme obtenue est maintenue par collage.

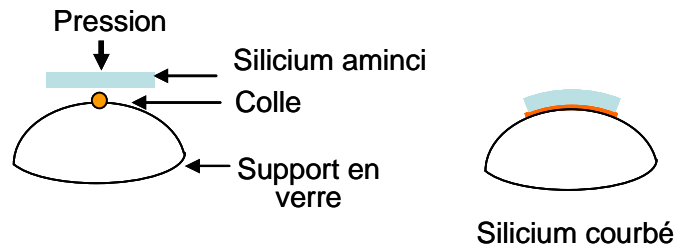


Figure B-21 : Procédé de courbure de carré de silicium aminci

Ce procédé s'inspire d'un essai mécanique de contact défini par la théorie de Hertz (Jochen Kothe & Jochen Kothe 1878) (Chateauminois 2008). Lorsque deux corps sont mis en contact, et sont pressés l'un contre l'autre, progressivement un des corps, voire les deux, se déforment. La zone de contact augmente progressivement. La contrainte se répartit dans une petite région autour du point de contact initial.

B.II.1.2 - Mise en forme sphérique par contact

Quelques travaux utilisent cet essai mécanique pour déformer un film mince sur une sphère. En particulier, les recherches de Hure et al (Jérémy Hure et al. 2011) sur la courbure convexe de films minces s'approchent de mes objectifs de mise en forme sphérique (Figure B-22).

Les véhicules de test sont des films élastiques (module de 2,6 GPa) en polypropylène, d'épaisseur variant entre 15 μm et 90 μm . Le corps rigide est une sphère de verre ou de polystyrène. La déformation sphérique du film contre la sphère et le maintien de la courbure sont obtenus par capillarité avec une interface mouillable d'éthanol.

Ces travaux illustrent le potentiel de cette technique dont les rayons varient de 25 mm à 500 mm. Mais cette mise en forme montre une déformation qui n'est pas parfaitement sphérique. Le défaut caractéristique est la formation de pliures sur la périphérie (Jeremy Hure et al. 2010). Pour un rayon de 197 mm, elles ont une largeur de 2 mm à 16 mm et pénètrent dans le matériau tandis qu'elles déforment tout le film lorsque la courbure est plus forte (Figure B-22 b et c). Ainsi, la surface parfaitement sphérique obtenue par cette solution de mise en forme, est trop faible pour répondre à mon objectif.

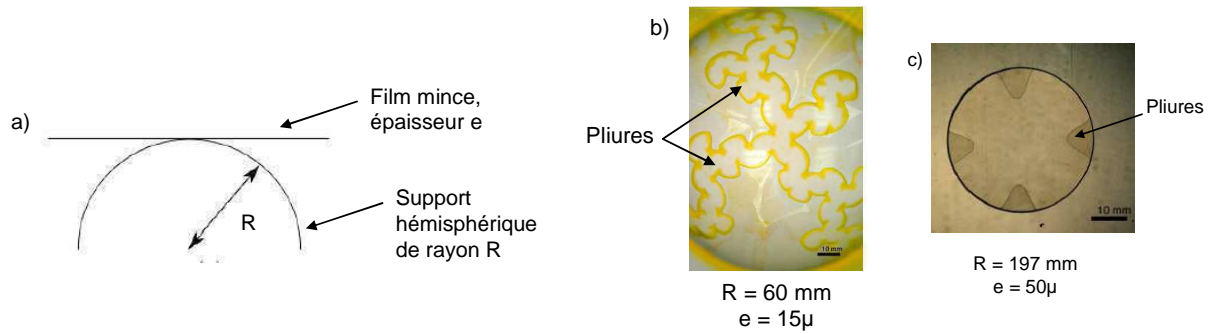


Figure B-22 : Mise en forme hémisphérique par capillarité (Jeremy Hure et al. 2010)

a) Technique : un film mince sur une sphère ; Résultat de courbure : observation de pliures b) film de 15 μm d'épaisseur courbé à un rayon de 60 mm ; c) film de 50 μm d'épaisseur courbé à un rayon de 197 mm

Il est néanmoins possible de faire un parallèle entre ces expériences et le procédé développé. Le support rigide est la demi-sphère en verre. L'échantillon de silicium forme le corps souple à déformer, cependant, contrairement au film, le matériau de ma thèse est cristallin, et les pliures peuvent créer des clivages. Afin de les diminuer, mon choix a été de contraindre plus fortement l'échantillon afin d'exploiter toute l'élasticité du silicium et ainsi former une surface sphérique plus importante. Cette force est appliquée, dans mon procédé, grâce à un outil qui, au contact de l'échantillon, fait office de presse. Les détails de cet outil ne seront pas détaillés dans ce manuscrit pour des raisons de confidentialité. Il a évolué tout au long de ma thèse pour garantir une application progressive et contrôlée de la force afin d'éviter la formation des pliures.

Le procédé de courbure met donc en jeu trois corps : le support, le composant et l'outil. Le support en verre est rigide, concave ou convexe, au rayon de courbure visé. Le corps déformable est un composant aminci (échantillons de silicium, détecteur...).

D'un point de vue mécanique, le procédé peut être défini comme l'interaction entre deux contacts :

- outil et échantillon
- échantillon et verre support

La gestion de ces deux contacts est primordiale et a concentré l'effort technologique principal des ces trois années de thèse.

B.II.1.3 - Evaluation du procédé : résultats de courbure

Le procédé de courbure est développé sur des plaques de silicium, dont les dimensions sont fixées dans cette étude : ce sont des carrés de 10x10 mm² et de 25 µm d'épaisseur.

Les échantillons utilisés sont amincis par procédé DBG (Dicing Before Grinding) chez Disco (Disco 1998). La procédure d'amincissement (Figure B-23) consiste à pré découper une tranche de silicium de 150 mm de diamètre en des carrés de 10x10 mm² avant de réaliser les étapes d'amincissement (Disco 2005).

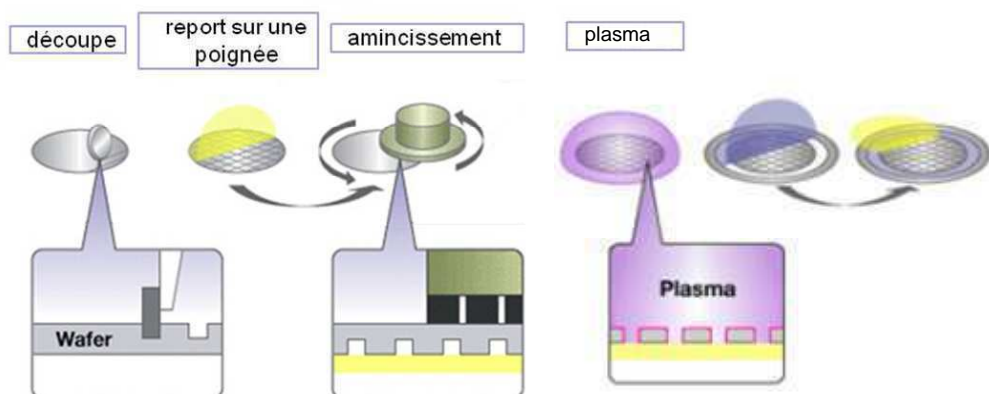


Figure B-23 : Procédé d'amincissement réalisé chez Disco

La tranche est découpée sur la quasi-totalité de l'épaisseur puis reporté sur une poignée afin d'être transportable. La tranche est ensuite amincie par une technique de polissage à sec jusqu'à séparer les puces unitaires. Deux étapes de déstressage (gravure plasma et traitement chimique) sont réalisées afin de diminuer les contraintes résiduelles dans le matériau liées au polissage à sec. La tranche est ensuite reportée sur le support final.

La courbure obtenue est présentée à la Figure B-24. L'échantillon de 10x10 mm² est courbé sur le verre support convexe à un rayon de 47 mm.

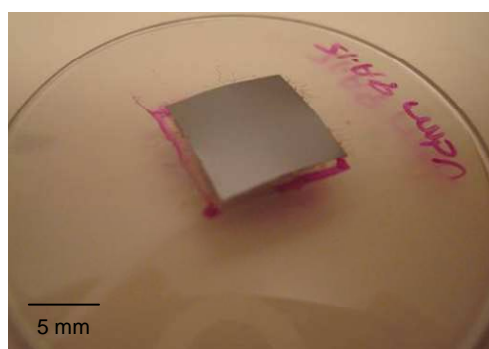


Figure B-24 : Courbure convexe d'un carré de silicium : 10x10 mm² épaisseur 25 µm

La courbure obtenue est caractérisée par un profilomètre mécanique. Une pointe balaye la surface de l'échantillon par un mouvement en x et y de la table ; le mouvement en z correspond au déplacement de la pointe au contact de la surface, la course accessible étant de 2 mm. Le traitement informatique permet de reconstruire la forme tridimensionnelle de l'échantillon. La caractérisation est faite par trois analyses. La première image (Figure B-25

A) correspond à la surface balayée par la pointe ; c'est la donnée brute. La deuxième image (Figure B-25 B) représente la surface parfaitement sphérique que le logiciel déduit de la Figure B-25 A ; cette analyse permet de déterminer le rayon de courbure de l'échantillon (rayon parfait). La Figure B-25 C est l'écart à la sphère parfaite, qui montre les défauts de courbure de l'échantillon. Les dernières images B et C représentent la décomposition de la surface balayée A.

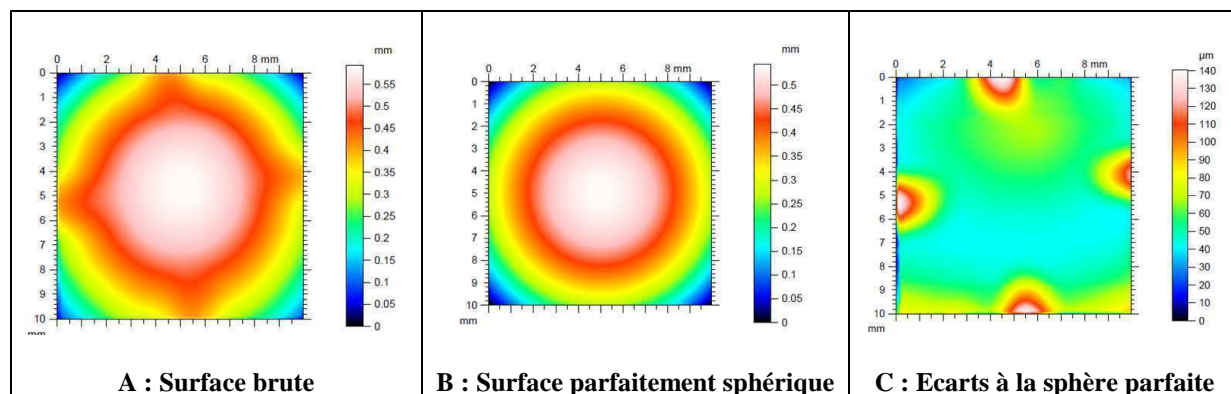


Figure B-25 : Caractérisation au profilomètre d'un carré de silicium, courbé (46,5 mm) en convexe

L'échantillon de silicium, présenté ici, est courbé avec un rayon de 46,5 mm. L'analyse au profilomètre montre le défaut caractéristique de la mise en forme sphérique d'un plan : les extrémités des médianes de l'échantillon se relèvent. Ces pliures correspondent aux déformations observées dans les travaux de la référence (Jeremy Hure et al. 2010). Néanmoins, la courbure est plus importante et les pliures de l'échantillon courbé sont plus faibles que celles obtenues sur le film. Physiquement, ces pliures se caractérisent par un soulèvement sous lequel la colle est absente. La Figure B-26 montre cette pliure en vue isométrique. Dans cet exemple, les pliures ont des hauteurs comprises entre 94 μm et 70 μm.

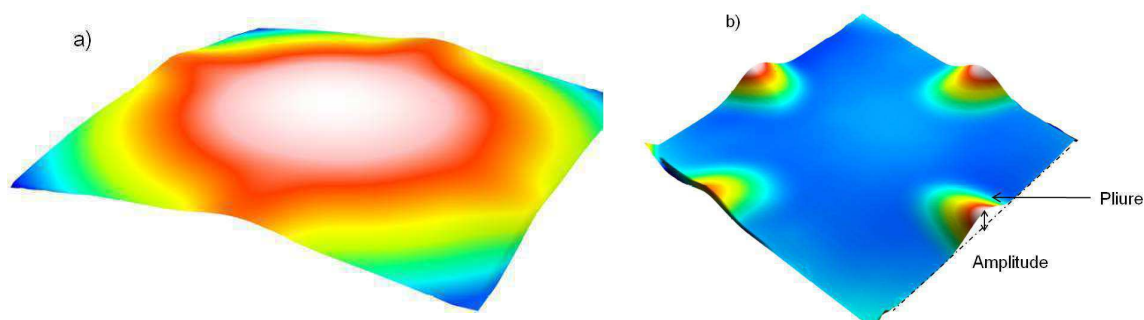


Figure B-26 : Observation des pliures : a) Surface brute en 3D ; b) Ecart à la sphère

L'objectif du procédé de courbure consiste à supprimer ces pliures afin d'obtenir une surface parfaitement sphérique. L'application de la force sur l'échantillon est primordiale, et une première optimisation concerne l'outil de courbure. Il y a deux axes d'optimisation :

- le gabarit de l'outil : dimensions, forme, propriétés mécaniques
- le positionnement de l'outil.

B.II.2 - Optimisation du procédé par l'outil

B.II.2.1 - Gabarit de l'outil

La forme de l'outil détermine la dimension de la zone de contact. Une zone de contact trop faible laisse la périphérie de l'échantillon peu contrainte et des pliures apparaissent. Ce résultat est montré sur la Figure B-27. Le verre support a un rayon de 48 mm ; l'échantillon est courbé à 45,7 mm de rayon. L'écart à la sphère parfaite (Figure B-27 C) montre quatre pliures dont les hauteurs mesurent majoritairement 110 μm .

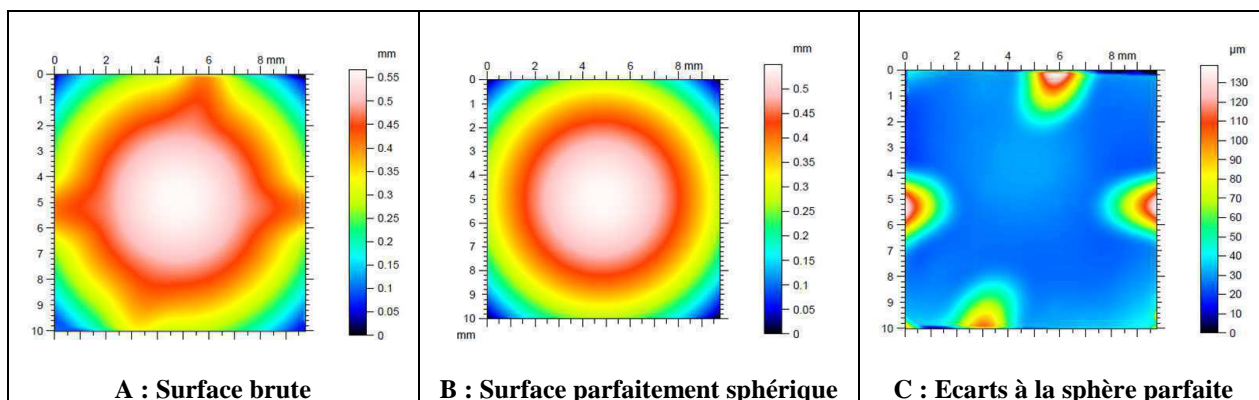


Figure B-27 : Caractérisation au profilomètre d'un carré de silicium courbé (45,7 mm) en convexe

Nous allons comparer ce résultat avec la Figure B-28 qui montre un échantillon de silicium de même format courbé sur le même support, avec un outil adapté : la zone de contact correspond à la taille de l'échantillon. Dans ce cas, le rayon de courbure est de 47,6 mm. La figure des écarts à la sphère montre une seule pliure avec une amplitude de 94 μm .

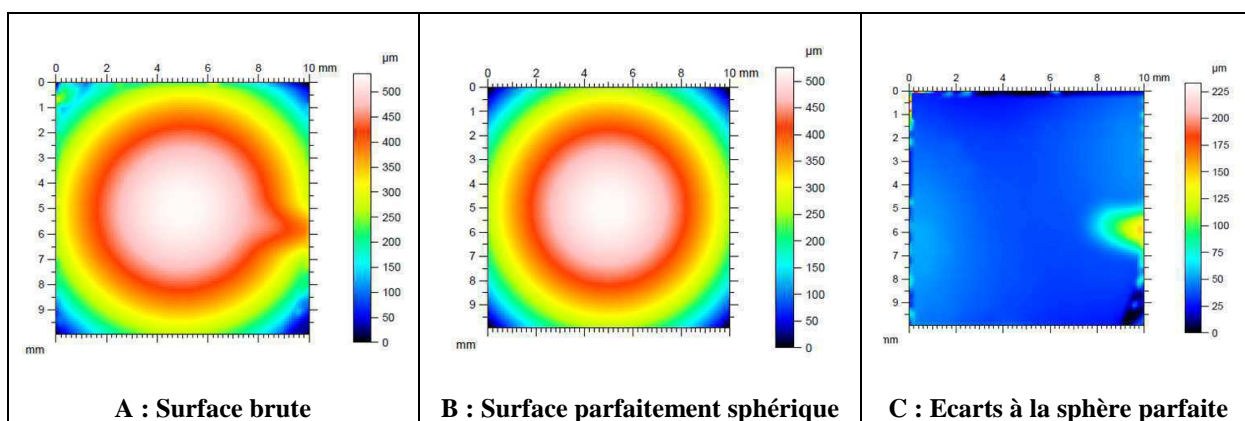


Figure B-28 : Caractérisation au profilomètre d'un carré de silicium courbé (47,6 mm) en convexe

A ce stade de l'étude, une première définition de la qualité de courbure peut être donnée. Un résultat de courbure est considéré comme « bon », lorsque l'échantillon de silicium présente peu de pliures (idéalement aucune), et que l'écart entre le rayon obtenu et le rayon du verre support est minimal, idéalement nul.

Dans ces exemples, l'échantillon de la Figure B-28 a un meilleur résultat de courbure. L'écart entre le rayon du support et le composant est de 1 mm ce qui représente un écart de 2,3 %, alors que celui de la Figure B-27 a un écart de 2,3 mm soit 4,8 %.

L'outil de courbure permet donc de diminuer l'écart entre les rayons du support et de l'échantillon. L'optimisation de l'outil permet de contrôler plus précisément les conditions aux limites du procédé, ce qui entraîne une diminution de l'amplitude des pliures ainsi qu'une réduction des écarts à la sphère.

B.II.2.2 - Position de l'outil

L'application de la force doit se faire de telle sorte que l'échantillon soit parfaitement en contact avec le support. Si tel n'est pas le cas, la plaque de silicium est libre de se déformer et génère des pliures ; le cas critique serait qu'il ne se déforme pas et reste plan sur un côté. L'alignement de l'outil participe donc à l'obtention d'une sphère parfaite.

Courbure & outils de presse

Le critère de qualité de courbure utilisé est l'analyse de la surface des écarts à la sphère, qui est défini principalement par deux facteurs : le nombre de pliures, et l'écart, qui doit être minimisé, entre le rayon théorique (le support) et celui obtenu (l'échantillon de silicium). Pour cela, l'outil doit présenter une zone de contact identique à la taille de l'échantillon. De plus, le procédé de courbure doit permettre l'alignement de l'outil avec l'échantillon, assurant une meilleure reproductibilité. Une fois l'échantillon reporté sur le support, la courbure doit être conservée. Pour cela, l'échantillon est collé sur le support lors de sa mise en forme.

Par conséquent, la qualité de courbure de l'échantillon dépend également de ce collage et la partie suivante va traiter du maintien de la forme sphérique.

B.II.3 - Maintien de la forme sphérique

Le procédé de courbure consiste à déformer l'échantillon en reproduisant l'enveloppe du corps indéformable. La pression de l'outil contre le support entraîne la déformation progressive de l'échantillon. Le paragraphe précédent a montré l'importance de la forme de l'outil mais il est primordial que la forme sphérique obtenue soit conservée par le collage.

B.II.3.1 - Interface de collage

Le maintien de la courbure nécessite le choix d'une colle appropriée. Ses caractéristiques obéissent à différents impératifs liés au procédé :

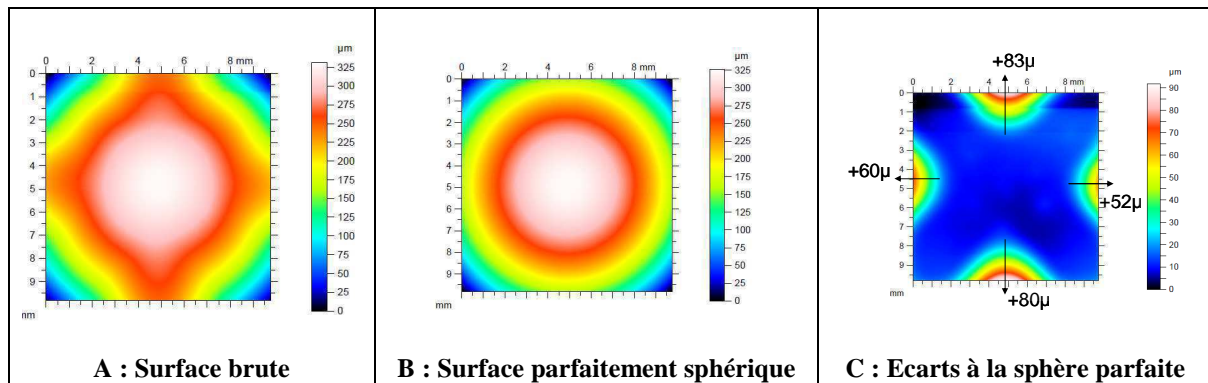
- fluidité à la dépose pour favoriser le bouchonnage,
- réticulation à basse température pour ne pas dégrader le composant,
- maintien d'un couplage mécanique afin de garantir la courbure à long terme.

Des tests ont été menés avec de la résine de photolithographie, de la cire et de la résine époxy. Des essais d'adhérence hydro-moléculaire ont également été effectués. Le choix s'est porté sur le collage à l'Epoxy ; cette matière est fluide à la dépose et rigide après réticulation à basse température. Enfin, elle est parfaitement connue dans le domaine de la

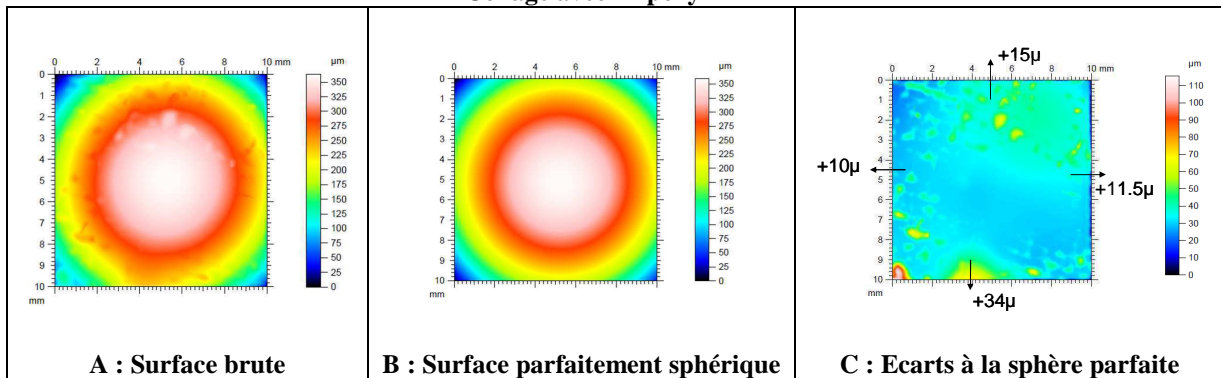
microélectronique et elle est largement utilisée dans le domaine du packaging de détecteurs infrarouge pour son faible dégazage et sa bonne tenue en environnement extrême.

Deux familles de colle ont été testées, avec chacune une viscosité différente : l'Epoxy « A », et la « B » avec une viscosité trois fois plus faible (Figure B-29 et Figure B-30 respectivement). La viscosité est définie comme la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans un corps. Elle décrit donc la capacité de la colle à fluer sous l'échantillon à une température donnée, sous l'effet de la force appliquée. Nous allons voir que ce paramètre influe sur le résultat : une faible viscosité favorise une meilleure reproduction de la forme du support.

Deux échantillons de siliciums ont été courbés au même rayon (74 mm), avec ces deux résines époxy dont les références sont tenues confidentielles.



**Figure B-29 : Caractérisation au profilomètre d'un carré de silicium courbé (74 mm) en convexe
Collage avec l'Epoxy « A »**



**Figure B-30 : Caractérisation au profilomètre d'un carré de silicium courbé (74 mm) en convexe
Collage avec l'Epoxy « B »**

Ces deux caractérisations montrent le même défaut que précédemment : le soulèvement des extrémités des médianes avec des amplitudes différentes. Dans le cas du collage avec l'Epoxy « A », la déformation est importante. L'échantillon de silicium présente quatre pliures dont les hauteurs varient entre 53 μm et 83 μm. Au contraire, l'Epoxy B ne présente qu'une seule pliure. Les irrégularités sur la surface balayée (Figure B-30), correspondent à des débordements de colle. La figure des écarts à la sphère montre que la pliure principale est de 34 μm, et les autres extrémités des médianes ont été mesurées à des hauteurs de l'ordre de la dizaine de micromètres, ce qui ne correspond pas à des défauts de courbure, mais aux défauts du verre support sur lequel je reviendrai par la suite. D'après les critères de réussite d'un collage, le meilleur résultat est donc obtenu avec l'Epoxy « B » de faible viscosité.

La répartition de la colle conditionne également le résultat de courbure. Cet impact est mis en évidence par interférométrie selon la technique développée chez Phasics (Primot & Sogno 1995) (Phasics 2009). La résolution apportée par ce système de caractérisation permet de distinguer les déformations locales de la surface de la plaque de silicium, tandis que les forts gradients de déformation (la pliure au nord de l'échantillon) ne peuvent pas être analysés.

Le résultat de cette caractérisation est présenté sur la Figure B-31. On observe un bourrelet de colle sur le coin supérieur droit de l'image qui laisse présumer une inhomogénéité de l'épaisseur de colle sur la surface globale. Cette variation explique en partie les écarts à la sphère et la différence entre les rayons de l'échantillon et du support.

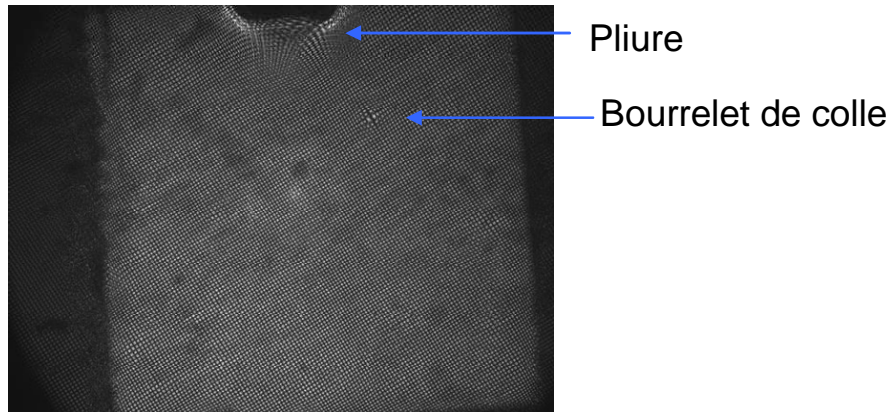


Figure B-31 : Surface brute obtenue par interférométrie

Cette technique de caractérisation est intéressante, puisqu'elle permet une analyse plus fine de la surface courbée. Elle devrait être mise en œuvre dès lors que les pliures sont éliminées.

B.II.3.2 - Support de courbure

Outre l'influence de la colle, la qualité du support modifie également le résultat de courbure. Pour mettre en évidence ce résultat, je vais étudier, dans cette partie, la surface brute du verre support avant de l'utiliser pour courber un échantillon de silicium que j'analyserai par la suite.

L'analyse de la surface des supports en verre a montré qu'elle n'était pas parfaitement sphérique, ce qui est montré par une caractérisation au profilomètre (Figure B-32). La surface balayée par la pointe (Figure B-32 A) semble sphérique mais l'écart à la sphère (Figure B-32 C) montre une déformation résiduelle cylindrique d'une amplitude approximative de 10 μm . Ces supports n'étant pas spécifiques à mes expériences, le rayon de courbure n'est pas constant sur la surface et ce défaut se répercute sur l'échantillon de silicium.

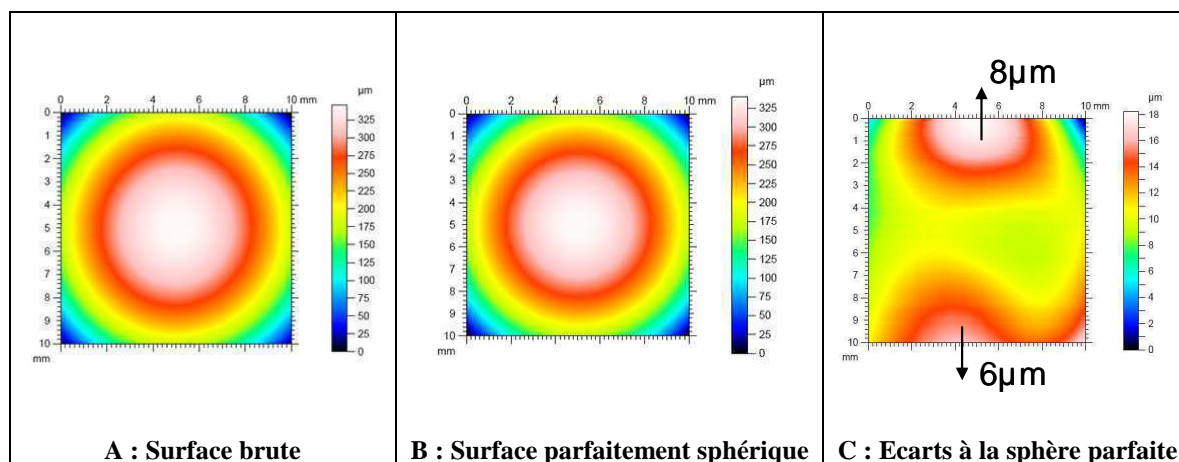


Figure B-32 : Caractérisation au profilomètre mécanique d'un verre support

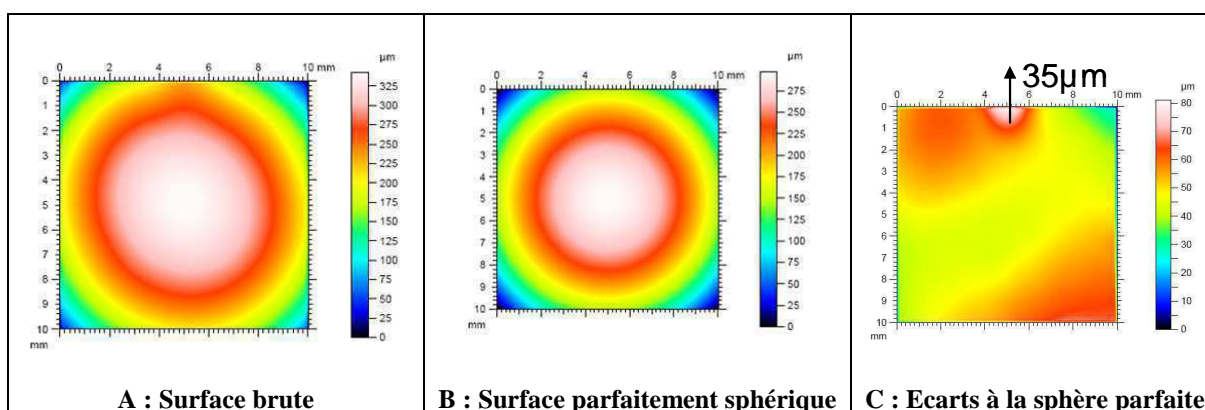


Figure B-33 : Caractérisation au profilomètre d'un carré de silicium courbé (83,8 mm) en convexe

La courbure de la plaque de silicium obtenue sur ce support est bien sphérique (Figure B-33 B) et le rayon de courbure est de 83,8 mm. L'écart à la sphère montre une pliure de 35 μm , mais nous pouvons également observer une déformation cylindrique résiduelle (Figure B-33 C). Cette déformation correspond à celle qui avait été mise en évidence dans la caractérisation précédente du verre.

Par conséquent, l'échantillon suit parfaitement la forme du support utilisé et les défauts de celui-ci se répercutent sur le composant. Le résultat de courbure obtenu dépend donc de la qualité du support.

Ainsi, ces supports ne conviennent pas parfaitement au procédé. Bien entendu, il s'agit là d'essais de laboratoire pour effectuer une première preuve de concept. Une première optimisation consiste à utiliser des lentilles qui présentent une tolérance sur le rayon de $\pm 0,5\%$ (CVI 2011). Cette homogénéité de surface peut être vérifiée avec les caractérisations au profilomètre mécanique. Ce contrôle consiste à mesurer la dispersion du rayon de la surface réelle par rapport à la surface parfaite. Les rayons moyens correspondent aux profils de la surface balayée tracés sur les médianes (profil nord/sud et est/ouest) et les diagonales (Figure B-34).

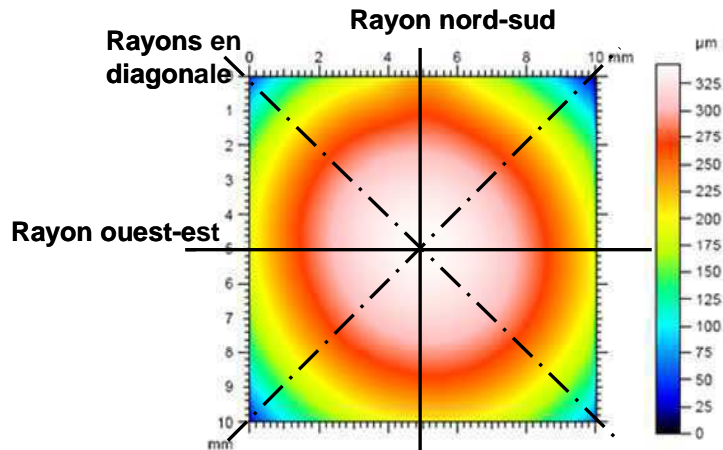


Figure B-34 : Les 4 rayons mesurés sur le verre support

Les résultats montrent que les lentilles ont une valeur de dispersion mesurée entre 0,1 % et 0,3 % alors que les verres de montre ont une dispersion plus importante entre 0,1 % et 4 %.

Ainsi, pour les courbures des détecteurs fonctionnels, j'utiliserai des lentilles de qualité optique, sachant qu'en définitive il est possible de réaliser une céramique de report hémisphérique. La conception d'un fond de boîtier courbé avec le bon rayon est l'optimisation ultime du procédé.

Courbure & procédé

J'ai développé un procédé de courbure qui se base sur l'amincissement de l'échantillon et sur une mise en forme sphérique, par un contact entre l'échantillon et une surface au rayon ciblé. La courbure nécessite l'application d'une force sur l'échantillon qui est exercée en utilisant un outil de presse ; cet outil déforme l'échantillon contre le support courbé.

Le développement du procédé de courbure a mis en évidence les points importants à optimiser pour obtenir une surface parfaitement sphérique. Deux types de paramètres se distinguent : l'application de la force et le collage de l'échantillon sur le support courbé. Le système de courbure est centré, ce qui permet de contrôler l'alignement de la force sur l'échantillon indépendamment de l'opérateur. L'outil est conçu afin d'ajuster la zone de contact et de reporter au mieux la pression sur l'échantillon.

Le résultat de courbure est dépendant du collage et du support utilisé. Le développement du procédé de courbure a été caractérisé par rapport à deux critères : le nombre de pliures et l'écart entre le rayon du verre support et celui de l'échantillon de silicium. Ces deux critères sont utilisés dans la partie suivante qui est dédiée au comportement de la structure en silicium lors de sa mise en forme hémisphérique.

B.III - Courbure d'échantillons de silicium : étude matériau

Le procédé ayant été décrit dans la partie précédente, nous allons maintenant étudier le comportement des échantillons de silicium lors de leur mise en forme en calotte sphérique. L'objectif est d'évaluer expérimentalement le potentiel de courbure concave et convexe de ce matériau en fonction de deux paramètres caractéristiques : le rayon et l'épaisseur.

Ces résultats seront analysés selon les critères de réussite définis précédemment. Le même travail sera effectué par simulation avec un logiciel de calcul par éléments finis, et les résultats seront comparés aux conclusions expérimentales.

B.III.1 - Etude de la courbure convexe

La première étude porte sur la courbure convexe d'un carré de silicium de 10x10 mm² et de 25 µm d'épaisseur, qui sera analysée selon le rayon et le nombre de pliures. L'étude similaire sera menée sur des échantillons dont l'épaisseur est double.

B.III.1.1 - Influence du rayon de courbure

Les verres supports ont des rayons de courbure qui varient entre 40 mm et 80 mm. Pour évaluer la reproductibilité de la courbure d'échantillon de silicium sur le support, je vais comparer dans une première partie, le rayon du support avec le rayon de l'échantillon de silicium, puis j'analyserai la présence de pliures.

B.III.1.1.1 - Comparaison des rayons

Les caractérisations précédentes ont montré un écart entre le rayon du support et celui de l'échantillon. Cet écart est dû à l'inhomogénéité de colle et à la présence des pliures. Le rayon mesuré sur le composant prend également en compte les défauts du verre support, étant donné que l'échantillon reproduit son irrégularité.

Ces trois influences seront analysées dans cette partie au travers de la mesure :

- du rayon de la surface parfaitement sphérique : le rayon parfait est mesuré sur la surface déduite de l'analyse au profilomètre (Figure B-35 B)
- les rayons moyens mesurés sur la surface brute (Figure B-35 A). Etant donné qu'elle n'est pas homogène, elle se caractérise par deux rayons moyens : le rayon passant par les pliures (Figure B-36 A) et le rayons passant par les diagonales (Figure B-36 B).

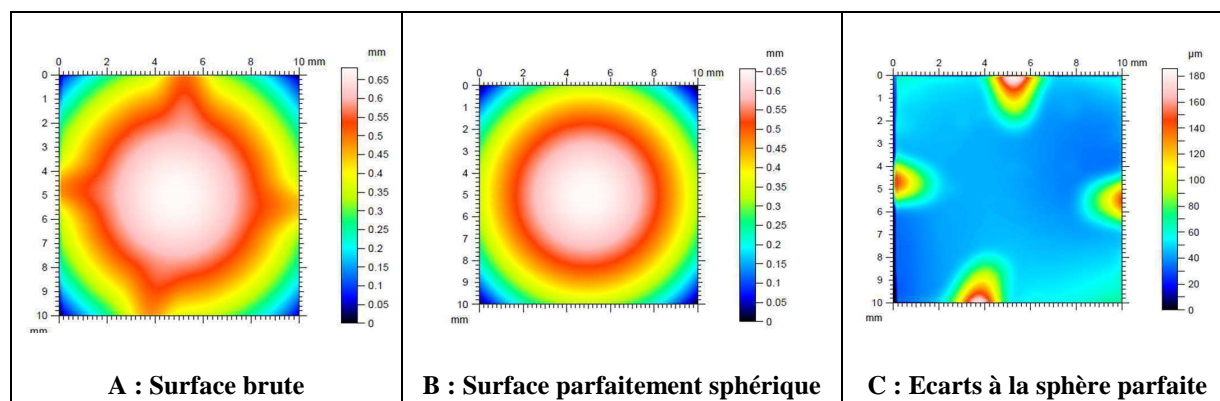


Figure B-35 : Caractérisation au profilomètre d'un carré de silicium courbé (38,9 mm) en convexe

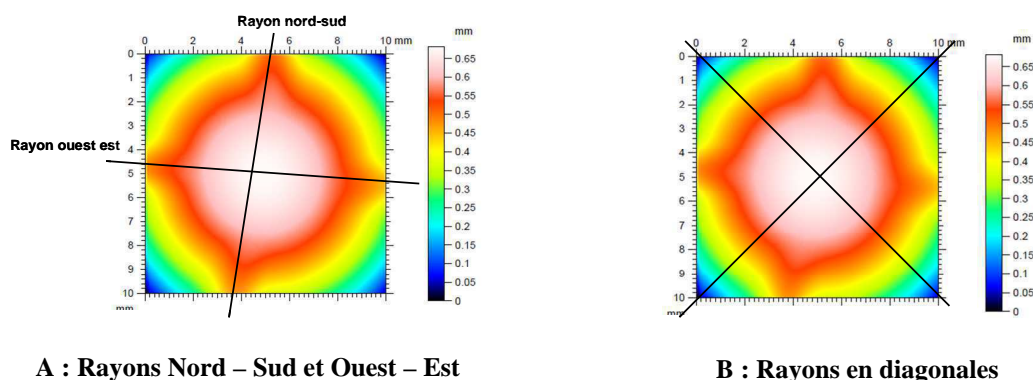


Figure B-36 : Rayons mesurés sur la surface balayée

La première comparaison consiste à évaluer les rayons parfaits. Cette comparaison apparaît dans la première ligne du Tableau B-5. L'écart est mesuré entre 1,5 % et 2,3 % et reste constant lorsque le rayon évolue de 40 mm à 60 mm.

	Silicium	Support	Silicium	Support	Silicium	Support
Rayon parfait (mm)	38,9	39,6	47,7	48,8	55,0	55,8
Flèche (μm)	f = 321	f = 315	f = 262	f = 256	f = 227	f = 224
Rayon moyen Nord Sud & Ouest Est (mm)	50,2	39,4	52,7	48,7	62,1	57,1
Flèche (μm)	f = 249	f = 317	f = 237	f = 256	f = 201	f = 219
Rayon moyen des diagonales	39,4	39,9	49,0	48,4	55,0	55,9
Flèche (μm)	f = 317	f = 313	f = 255	f = 258	f = 227	f = 223

Tableau B-5 : Rayons de courbure et flèche des échantillons de silicium courbés en convexe et le support
Comparaison des 3 techniques de mesure : rayon de la sphère parfaite (précision de mesure : 75 μm),
rayons passant par les pliures et passant par les diagonales de l'échantillon (précision de mesure sur le
silicium : 750 μm ; précision sur le verre support : 200 μm)

Les deux rayons moyens permettent d'évaluer l'influence des pliures sur la qualité sphérique obtenue. La comparaison est réalisée entre la moyenne des rayons mesurés sur les profils Nord-Sud et Est-Ouest (prise en compte des déformations maximales du composant), avec la

moyenne des rayons qui passent par les diagonales du carré de silicium (surface parfaite de la surface brute).

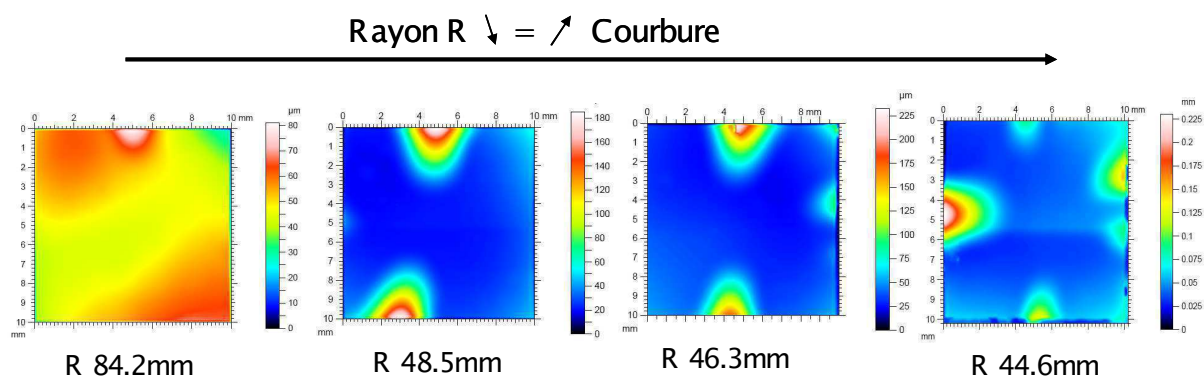
Le tableau montre que le rayon du verre support est constant quelle que soit l'orientation analysée. En effet, ils ne présentent qu'une inhomogénéité de surface et aucun défaut d'ordre local, comme les pliures présentes sur les carrés de silicium. Ainsi, contrairement au support, les rayons mesurés sur les échantillons courbés varient selon la technique de mesure. Les rayons passant par les pliures (1^{ère} ligne du Tableau B-5) présentent un écart plus important par rapport au verre support. L'écart se situe entre 4 mm et 10 mm par rapport au rayon théorique du support. Par contre, les rayons passant par les diagonales montrent un écart beaucoup plus faible entre 0,2 mm et 0,8 mm. Les mesures sur les profils des diagonales correspondent bien aux rayons mesurés sur la sphère parfaite. La répétabilité des mesures du rayon au profilomètre est estimée à 0,5 mm.

Ainsi, ces résultats montrent que les pliures entachent la mesure du rayon et l'homogénéité de la courbure sur la surface est modifiée de manière non négligeable. Je vais alors quantifier les trois premiers critères de réussite de mise en forme :

- la mesure du rayon parfait doit être égale à celui du support,
- le nombre de pliures doit être minimisé, idéalement zéro,
- l'écart à la sphère doit être minimisé : le rayon moyen passant par les pliures doit égaler le rayon passant par les diagonales. Considérant un rayon moyen de ces deux mesures, l'écart avec le support doit être inférieur à 3%. Cette valeur permet aux courbures recherchées d'obtenir un défaut des écarts à la surface parfaite inférieur à 10 μ m.

B.III.1.1.2 - Nombre de pliures

Cette étude se focalise sur le nombre de pliures lorsque le rayon de courbure diminue de 84 mm à 40 mm. La Figure B-37 montre l'évolution de la surface des écarts à la sphère où les déformations apparaissent clairement. Elles permettent ainsi de qualifier l'état de surface obtenue en fonction du nombre de pliures présentes sur les échantillons de silicium.



**Figure B-37 : Surfaces des écarts à la sphère parfaite – Courbure convexe 10x10 mm² épaisseur 25 μ m
Influence du rayon de courbure sur le nombre de pliures**

Pour un rayon de 84 mm, l'échantillon de silicium ne présente qu'une seule pliure ; lorsque'il est courbé à 44,6 mm, on peut atteindre 5 pliures. Le nombre de pliures augmente donc progressivement avec la courbure, réduisant ainsi la surface parfaitement sphérique.

B.III.1.2 - Influence de l'épaisseur sur la courbure

Le même travail est effectué pour les échantillons de 10x10 mm² et de 50 µm d'épaisseur. Comme précédemment, le rayon de la sphère parfaite des échantillons est comparé avec le verre support. Les écarts mesurés (Tableau B-6) sont constants pour une courbure croissante. La variation reste inférieure à 1 mm ce qui représente un écart inférieur à 1,9 %. Ainsi, le composant à 50 µm semble mieux épouser le support en comparaison avec les échantillons de 25 µm d'épaisseur.

Rayon du support (mm)	Rayon du silicium (mm)	Ecart en rayon (mm)
39,2	39,5	-0,3
39,5	40,2	-0,8
44,2	44,2	0,0
44,9	45,3	-0,4
45,0	44,5	0,5
46,1	46,9	-0,8
46,6	47,0	-0,4

Tableau B-6 : Silicium : 10x10 mm² - épaisseur 50 µm (précision des mesures 75 µm)

L'analyse des surfaces des écarts à la sphère des échantillons de 50 µm montre le même comportement : le nombre de pliures augmente avec la courbure. Cependant, l'évolution est moins rapide. La Figure B-38 montre qu'un carré de silicium d'épaisseur 25 µm présente quatre pliures pour des rayons de 46 mm alors qu'un échantillon de 50 µm, atteint des rayons de 40 mm avec cette même déformation.

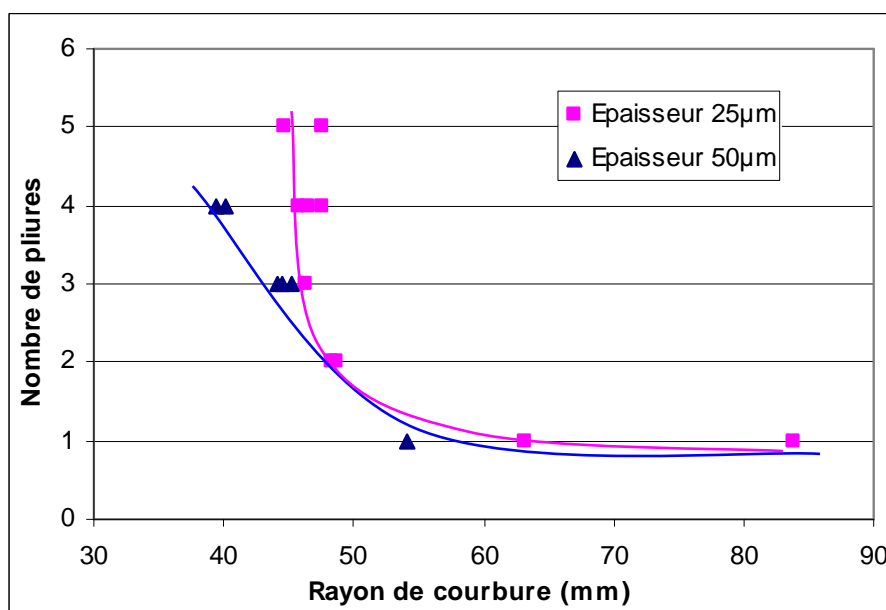


Figure B-38 : Evolution du nombre de pliures selon l'épaisseur de l'échantillon

Ce comportement différent en termes de pliures influe sur la qualité de courbure obtenue. Pour la caractériser, il est intéressant d'isoler la surface parfaitement sphérique de l'échantillon, qui est illustrée par le cadre noir sur les images de la Figure B-39. Elles représentent les écarts à la sphère obtenus par profilométrie. La surface parfaitement sphérique est définie hors des déformations locales de l'échantillon de silicium (pliures). La même analyse est menée sur les échantillons de 25 μm et 50 μm .

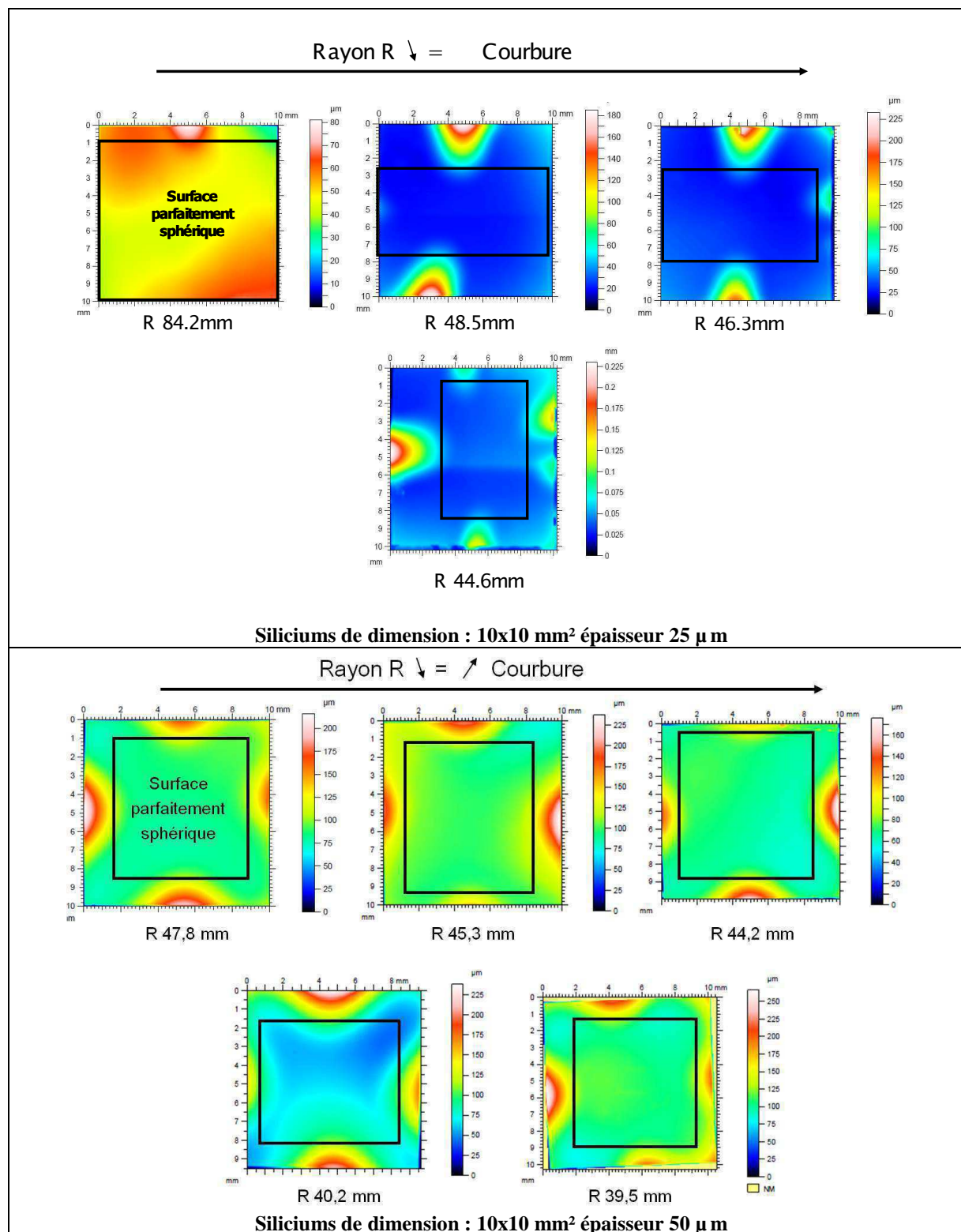


Figure B-39 : Comparaison des surfaces parfaitement sphériques – Epaisseur 25 μm et 50 μm

La surface parfaitement sphérique diminue lorsque la courbure augmente ; on observe le même comportement pour les échantillons de silicium de 25 μm et 50 μm d'épaisseur. Cependant, il apparaît que pour un rayon de courbure identique, le carré de 50 μm a une surface parfaitement sphérique plus importante que celle obtenue avec une épaisseur de 25 μm . Le graphe de la Figure B-40 montre cette diminution de la surface parfaitement sphérique pour les deux épaisseurs. A 50 μm , les échantillons peuvent atteindre des courbures plus fortes avec une surface parfaitement sphérique plus importante.

Cette analyse permet de définir le quatrième critère de mise en forme, la surface parfaitement sphérique doit être maximisée, notamment afin de correspondre à la surface active des détecteurs. Ainsi, cette surface doit être minimum de 50 % (TV/4 au pas de 25 μm) ; l'idéal étant que la totalité de la surface soit sphérique.

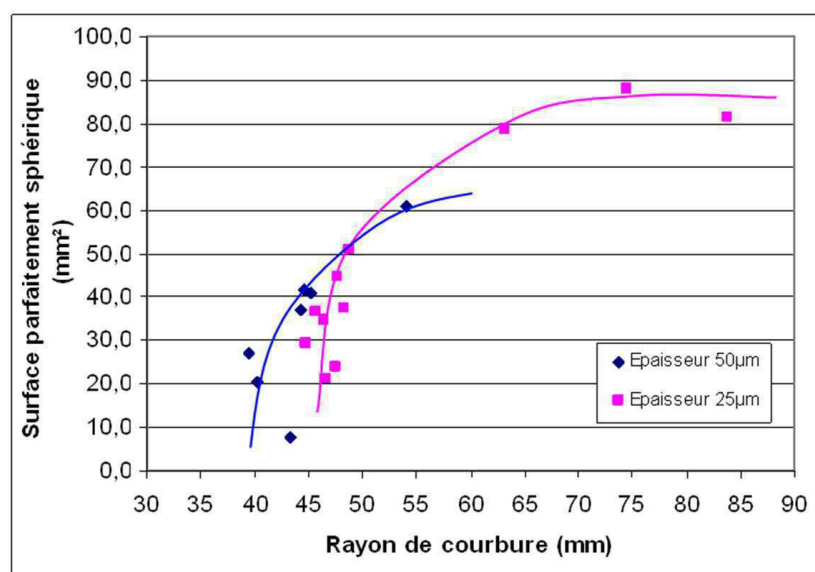


Figure B-40 : Surface parfaitement sphérique - Influence de l'épaisseur et du rayon de courbure

La surface parfaitement sphérique est délimitée par la profondeur de pénétration des pliures dans la surface. Les images de la Figure B-39 montrent que les pliures des échantillons de 50 μm d'épaisseur pénètrent moins profondément dans le matériau que celles obtenues sur des échantillons de 25 μm .

Considérant le transfert ultérieur du procédé sur des circuits fonctionnels, cette surface sphérique doit correspondre à la surface active ; elle doit donc être la plus grande possible. Le paragraphe suivant va étudier la forme de ces pliures selon l'épaisseur des échantillons.

B.III.1.3 - Amplitudes des pliures

Les pliures peuvent être caractérisées par leur longueur, leur amplitude et leur profondeur. Le schéma de la Figure B-41 illustre ces caractéristiques. La longueur est l'étendue du décollement le long de la périphérie et la profondeur est la pénétration de la pliure dans la surface.

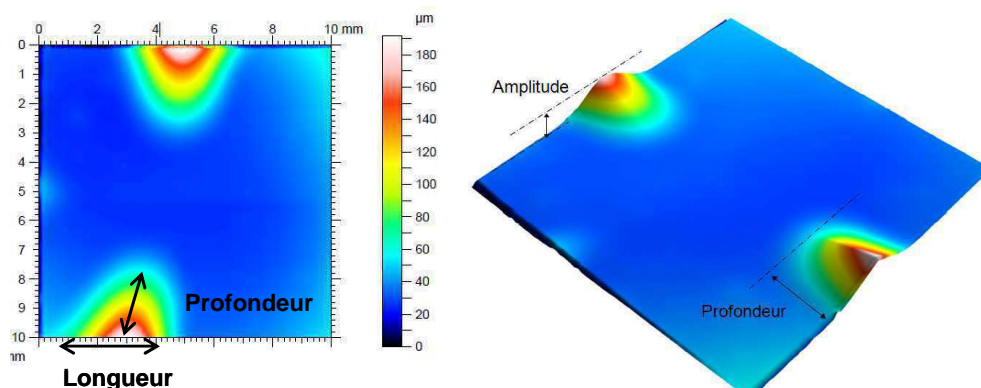


Figure B-41 : Description d'une pliure selon ces dimensions : longueur, profondeur, amplitude

L'observation des surfaces sphériques parfaites a montré que les pliures d'un carré de silicium de 50 μm d'épaisseur sont moins profondes, mais plus longues que les pliures obtenues à 25 μm d'épaisseur. La moyenne arithmétique des amplitudes est calculée pour quantifier ces résultats, étant donné la faible dispersion des valeurs obtenues pour chaque échantillon. Le graphe de la Figure B-42 illustre l'évolution des pliures pour les deux épaisseurs de matériau.

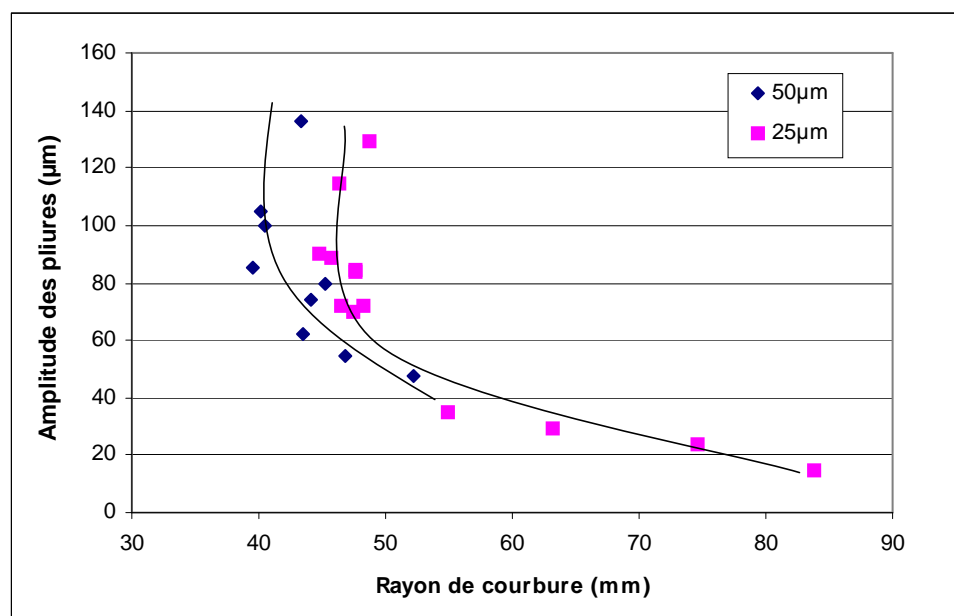


Figure B-42 : Amplitudes des pliures – précision de mesure +/- 5 μm

L'amplitude des pliures pour les deux épaisseurs d'échantillons augmente lorsque le rayon de courbure diminue. Avec de faibles rayons de courbure (forte courbure), la tendance du graphique montre des pliures plus importantes pour l'échantillon de silicium à 25 μm que pour des carrés de 50 μm d'épaisseur.

La caractérisation de la profondeur et de la longueur des pliures est présentée sur les Figure B-43 et Figure B-44.

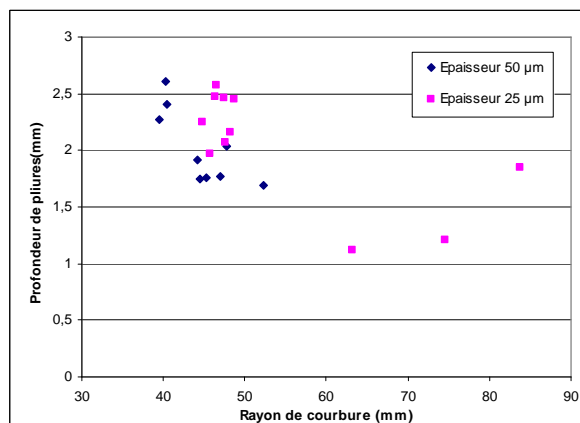


Figure B-43 : Profondeur des pliures

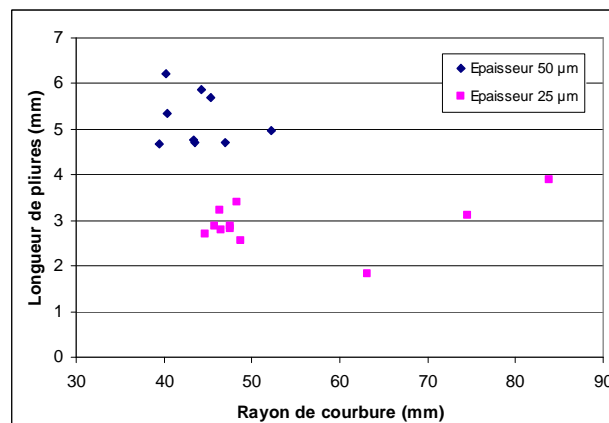


Figure B-44 : Longueur des pliures

Le premier graphe (Figure B-43) illustre la profondeur des pliures en fonction du rayon de courbure ; la tendance montre que pour une même profondeur, l'échantillon à 50 µm est courbé plus fortement. Par exemple, pour une profondeur de 2,25 mm, l'échantillon de 50 µm est courbé à un rayon de 39,5 mm, tandis que le rayon est de 44,7 mm pour une épaisseur de 25 µm. Le gain sur le rayon de courbure peut atteindre 6 mm.

Le comportement des pliures selon l'épaisseur de l'échantillon est plus marqué pour la longueur que pour la profondeur (Figure B-44). Les carrés de silicium à 50 µm d'épaisseur présentent des pliures plus longues (quasiment le double) que celles obtenues avec une épaisseur de 25 µm.

L'épaisseur des échantillons a donc une influence sur les déformations locales du matériau. Les pliures d'un composant de 25 µm sont moins longues mais profondes, ce qui diminue la surface utile. Au contraire, à 50 µm, les pliures sont longues mais pénètrent moins profondément dans le matériau, ce qui permet d'obtenir une surface parfaitement sphérique plus importante. Mon objectif est de courber un détecteur infrarouge fonctionnel ; il est nécessaire que la surface sphérique coïncide avec la surface active du détecteur, qui est approximativement de 51 mm². Ainsi il est préférable que les pliures s'étalent le long de l'échantillon plutôt qu'à l'intérieur. La valeur de 50 µm est l'épaisseur optimale pour répondre à mes objectifs de thèse. L'optimisation continue du procédé de courbure doit également permettre de diminuer les dimensions des pliures.

Comportement à la courbure d'échantillons de silicium

J'ai ainsi démontré que le silicium aminci se courbe sans cliver jusqu'à des rayons de 35 mm. Ce rayon ne constitue pas une limite intrinsèque car il est lié aux approvisionnements des verres supports et notamment aux rayons de courbure accessibles. L'épaisseur de l'échantillon modifie la forme des pliures obtenues. Les échantillons de 50 µm sont déformés principalement sur leur périphérie, tandis que pour une épaisseur de 25 µm, la surface est profondément déformée. Par conséquent, dans ce dernier cas, la surface parfaitement sphérique est diminuée et ne correspond plus à la surface active du détecteur.

Ainsi, l'épaisseur est un compromis entre la souplesse nécessaire pour courber les échantillons de silicium et une certaine rigidité qui permet de s'opposer à la propagation de la

déformation due aux pliures. L'épaisseur de 50 μm est l'épaisseur optimale pour courber les composants tout en conservant une surface utile maximale.

Cette épaisseur correspond au standard actuel de la microélectronique, notamment dans les systèmes 3D. La référence (Savastiouk 2000) montre les progrès dans les techniques d'amincissement et leur utilité dans ces systèmes appelés « SIP » (Silicon In Package). Ce choix est donc compatible avec le procédé de fabrication des composants infrarouge à grande échelle.

B.III.2 - Orientation de courbure : expériences et simulations

La partie précédente a permis d'optimiser l'épaisseur de l'échantillon à courber. Ce paragraphe se concentre sur la courbure concave d'échantillons de silicium et va permettre de comparer ces résultats avec la courbure convexe.

B.III.2.1 - Résultats de courbure concave

La courbure concave est obtenue par le même procédé étant donné que les verres de montre permettent également la courbure concave. Les mêmes défauts de surface sont observés sur ces supports. La photo de la Figure B-45 montre un carré de 10x10 mm² de silicium, courbé en concave à un rayon de 43 mm.

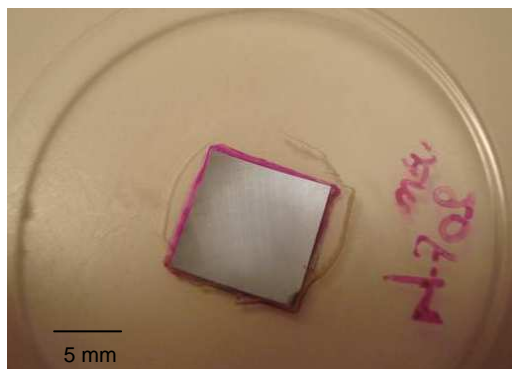
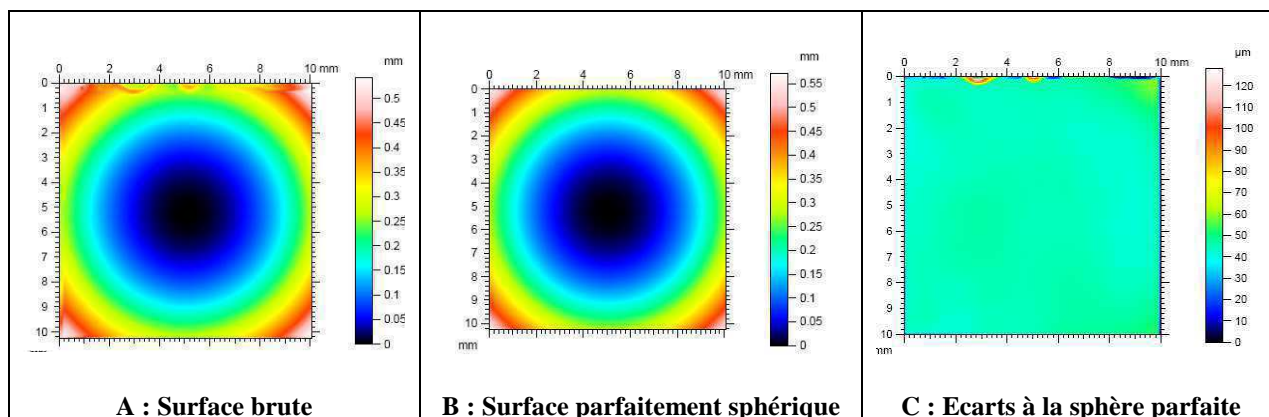


Figure B-45 : Silicium 10x10 mm² épaisseur 50 μm - Courbé en concave sur un verre de montre



La caractérisation de la Figure B-46 montre que l'échantillon de silicium a été courbé en concave à un rayon de 46 mm avec un verre support de rayon 48,7 mm. La surface analysée ne présente pas de déformation, ce qui est confirmé par la figure des écarts à la sphère. La courbure concave est donc parfaite. Par contre, pour un rayon de courbure identique, l'échantillon en convexe a quatre pliures (Figure B-47).

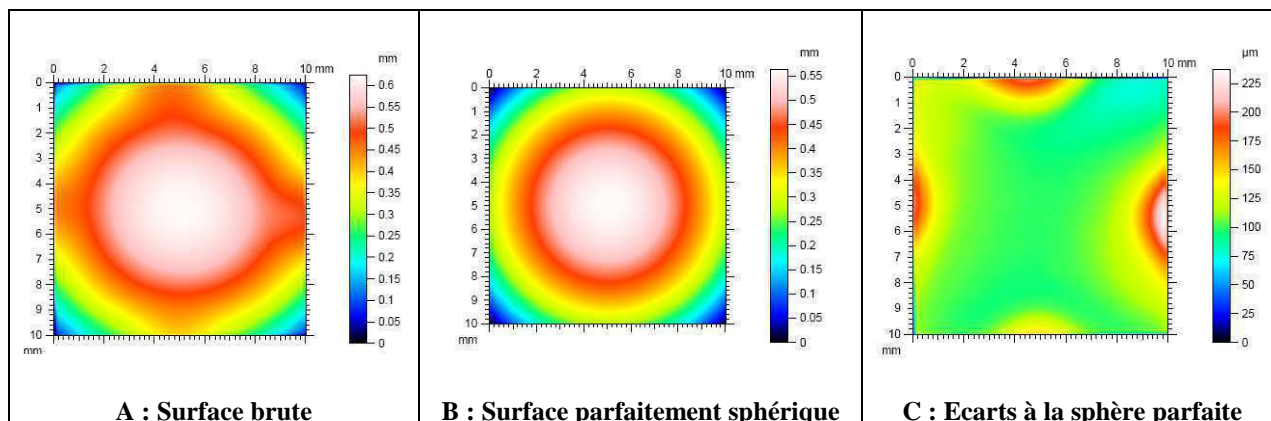


Figure B-47 : Caractérisation au profilomètre d'un carré de silicium courbé (45,3 mm) en convexe

Les rayons des verres supports et des échantillons de silicium concaves ont un écart de 4 % (variations de 1 mm à 2 mm). Cet écart est plus important que celui mesuré sur les carrés de silicium courbés en convexe. Cependant, les rayons moyens mesurés sur la surface brute sont plus homogène sur la surface concave ; l'écart maximal est de 20 % alors que les échantillons en convexe présente une dispersion de 35 %.

Comme dans le cas convexe, l'outil et le support influent sur la courbure obtenue. La surface visualisée au profilomètre Figure B-48 illustre une courbure réalisée avec un outil mal adapté.

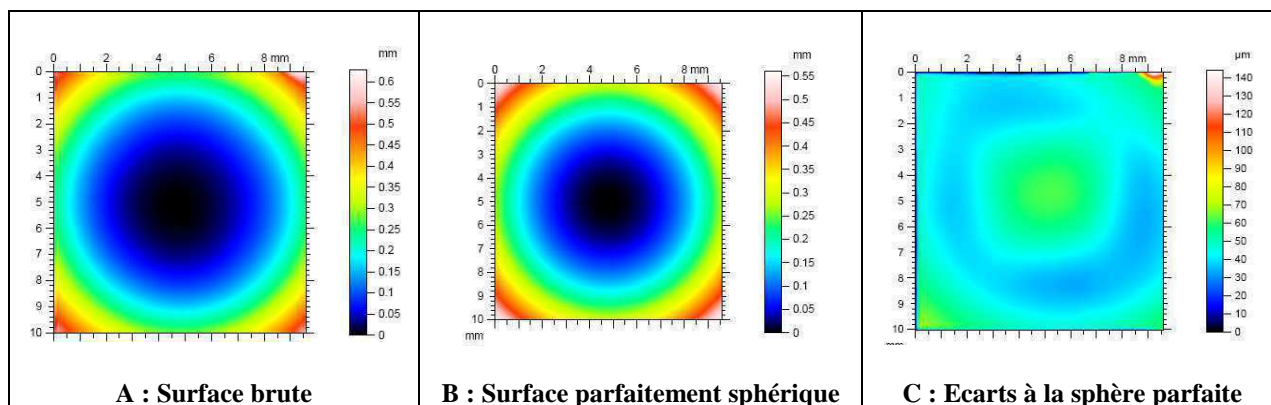


Figure B-48 : Caractérisation au profilomètre d'un carré de silicium courbé (43 mm) concave
Courbure avec un outil mal adapté

Le défaut de courbure résultant est illustré à la surface des écarts à la sphère (Figure B-48 C). On observe que le centre de l'échantillon est relevé d'une amplitude comprise entre 24 μm et 32 μm , ce qui correspond à un écart en rayon de courbure de 6 %. Ce défaut peut être contrôlé par une optimisation de l'outil comme le prouve la Figure B-46.

Cependant, ce défaut concave est préférable au défaut de courbure obtenu en convexe. En effet, il est de faible amplitude (une vingtaine de microns), tandis que celle des pliures est de l'ordre de la centaine de microns. Ainsi, la déformation des échantillons de silicium en

concave n'influe pas sur la surface parfaitement sphérique, mais modifie l'écart entre le rayon souhaité et le rayon obtenu.

Les résultats différents, obtenus pour les orientations concave et convexe, s'expliquent par la dissymétrie du système de courbure. L'étude du procédé dans ces deux cas montre que les conditions aux limites ne sont pas identiques (Figure B-49). En effet, la courbure convexe est réalisée en posant l'échantillon sur le sommet du support ; la force est appliquée progressivement de telle sorte que le composant soit contraint du centre vers la périphérie. Au contraire, la courbure concave est obtenue en posant l'échantillon au fond du support creux ; seule la périphérie est au contact du support. Lorsque la pression est exercée, l'échantillon se courbe à partir du centre et progressivement toute la surface est courbée mais la périphérie reste au contact du support.

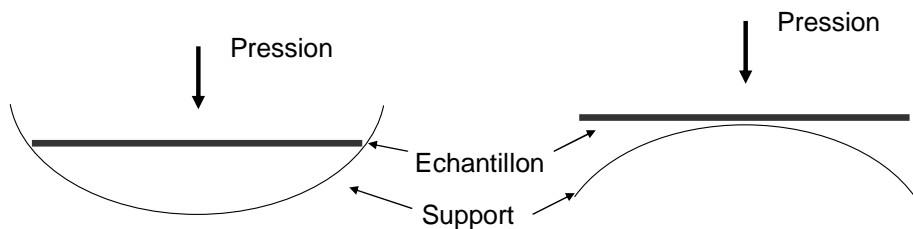


Figure B-49 : Dissymétrie du procédé de courbure selon les configurations

B.III.2.2 - Simulations de la courbure

Les deux configurations concave et convexe ont été simulées dans une première approximation où l'outil de courbure et le support ne sont pas pris en compte. Dans ces conditions, le procédé de courbure se décrit d'un point de vue mécanique par l'application d'une pression sur l'échantillon qui est fixé :

- en un point, au centre, dans la configuration convexe (Figure B-50 a)
- en appui simple sur les coins de l'échantillon lors de la courbure concave (Figure B-50 b).

La simulation est faite sur un quart de plaque ; des conditions de symétrie permettent de reconstruire l'échantillon entier.

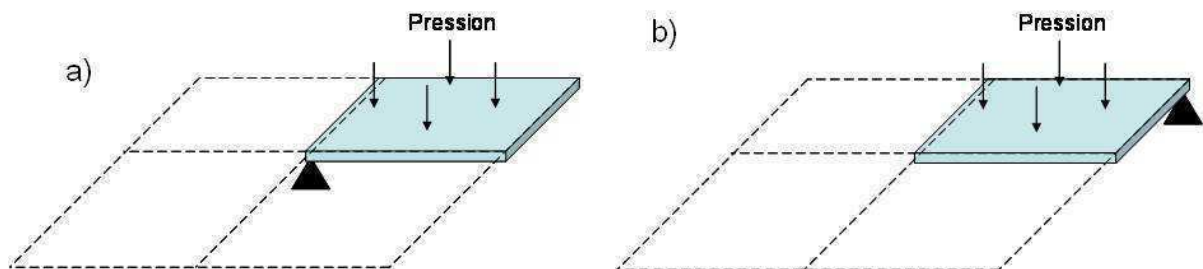


Figure B-50 : Structure simulée en première approximation : a) Structure courbée en convexe : point central fixé ; b) Structure courbée en concave : coin en appui simple

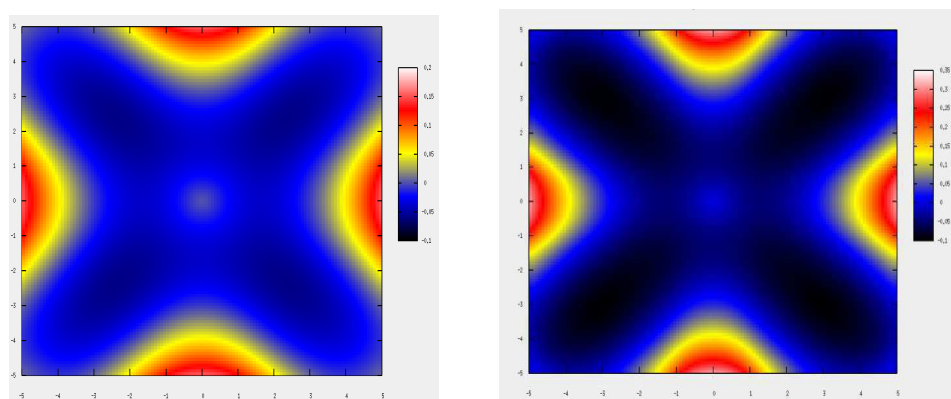
Sous l'influence de la pression, la plaque en flexion se déforme proportionnellement à la force appliquée. Etant donné que l'échantillon est maintenu par un seul point d'appui, la

déformation est sphérique. L'échantillon atteint un rayon minimum qui résulte de l'équilibre mécanique entre la pression appliquée, la réaction de l'appui et la rigidité du matériau.

La mise en forme sphérique de l'échantillon de silicium est représentée par une cartographie des déformations. La matrice des positions x, y, z des nœuds de la plaque en flexion est traitée afin de déterminer le rayon de la sphère parfaite qui inclut le maximum de points. Cette valeur correspond au rayon moyen mesuré avec le profilomètre mécanique.

B.III.2.2.1 - Courbure Convexe

Dans le cas de la courbure convexe, le centre de l'échantillon est bloqué dans les trois directions x, y, z. La simulation est réalisée sur une structure carrée de silicium de 50 μm d'épaisseur et avec quatre pressions différentes : 10 kPa, 47 kPa, 94 kPa, et 100 kPa. Les valeurs de 47 kPa et 94 kPa encadrent la pression réellement exercée sur le composant lors des expériences. L'augmentation de la pression permet d'atteindre des rayons de courbure plus faibles. Cette variation n'est pas linéaire ; les rayons de courbure sont respectivement de 92 mm, 32,4 mm, 19,6 mm et 18,7 mm. La Figure B-51 montre le comportement du silicium courbé en convexe aux deux pressions de 47 kPa et 100 kPa.



A : Pression de 47 kPa – Rayon 32,4 mm B : Pression de 100 kPa – Rayon 18,7 mm

Figure B-51 : Résultats de simulation de la courbure convexe d'un échantillon de 10x10 mm²

On observe sur la périphérie de l'échantillon, des déformations locales similaires aux pliures expérimentales. Elles ont une amplitude de 200 μm pour un rayon de courbure de 32,4 mm et de 350 μm pour un rayon de 18,7 mm (Figure B-51). Ainsi, l'amplitude des pliures augmente lorsque le rayon de courbure diminue ; ce comportement est identique à l'expérience et l'ordre de grandeur est similaire. Les déformations mesurées sont néanmoins supérieures, étant donné que les courbures obtenues par simulation sont plus importantes.

B.III.2.2.2 - Courbure Concave

Pour la courbure concave, les conditions aux limites changent. Les quatre coins sont en appui et peuvent se déplacer en x et en y. Leur déplacement en z n'est pas autorisé ; cette première approximation permet de simplifier le contact réel où ils peuvent glisser sur le support. Néanmoins, étant donné que la zone d'intérêt de la courbure concave est au centre de l'échantillon, la déformation des coins est négligée et ne sera pas prise en compte dans l'exploitation des résultats.

Les mêmes valeurs de pression utilisées en convexe sont appliquées sur l'échantillon c'est-à-dire : 10 kPa, 47 kPa, 94 kPa, et 100 kPa. Ces pressions permettent d'atteindre des rayons de courbure, respectivement de 58,3 mm, 21,1 mm, 15,2 mm et 14,8 mm, qui sont plus faibles que ceux obtenus dans l'orientation convexe. Cette différence de comportement est illustrée par le graphe de Figure B-52.

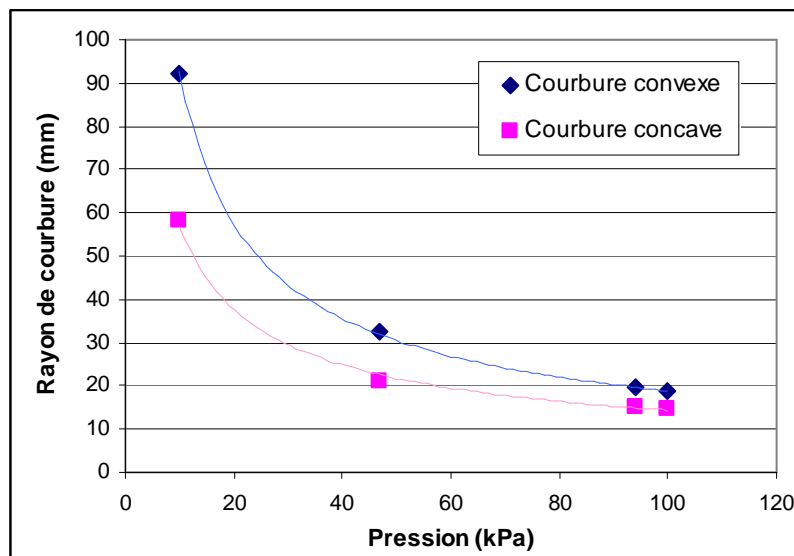
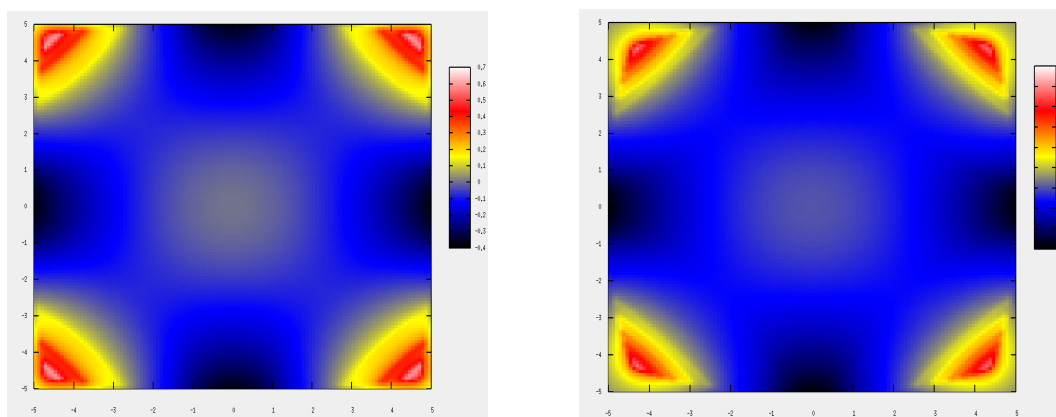


Figure B-52 : Influence de la pression sur le rayon de courbure

Ce premier résultat montre que les conditions aux limites de la courbure concave sont plus favorables à la mise en forme sphérique ; les pressions appliquées permettent d'accéder à de plus fortes courbures. Le point d'appui en périphérie permet une meilleure flexibilité de l'échantillon par rapport au point d'appui central, facilitant ainsi la mise en forme sphérique à moindre pression.

Les résultats de simulation permettent de comparer les déformations obtenus pour chaque orientation. La Figure B-53 présente les résultats de courbure concave à 47 kPa et 100 kPa.



A : Pression 47 kPa – Rayon 21,1 mm

B : Pression 100 kPa – Rayon 14,8 mm

Figure B-53 : Résultats des déformations des échantillons courbés en concave échantillon de 10x10 mm²

Contrairement à la courbure convexe, aucune pliure n'apparaît ; le seul défaut de sphéricité est le relevé du centre de l'échantillon, qui est de l'ordre d'une vingtaine de microns. Ce

même comportement a été observé lors de la courbure expérimentale avec un outil non optimisé. Dans ces cas, la faible contrainte exercée sur le centre de l'échantillon ne permettait pas une déformation sphérique parfaite en accord avec le support ; le matériau se déformait selon son comportement intrinsèque qui est mis en évidence dans ces simulations.

Courbure & orientation

Ces premières simulations sont similaires, pour les deux orientations, aux résultats expérimentaux. On observe les mêmes défauts de sphéricité mis en évidence dans l'étude matériau, et leurs évolutions avec le rayon de courbure sont identiques.

La différence de résultats de courbure concave / convexe s'explique par le procédé de courbure. En effet, la mise en forme sphérique est facilitée par les conditions aux limites de l'orientation concave, grâce aux faibles pressions appliquées et à l'absence de pliure. Cette dissimilitude, selon le sens de la courbure, s'explique par les degrés de liberté donnés au matériau. Pour la courbure convexe, le centre de l'échantillon est contraint par la symétrie de la structure qui est également le point d'appui du système. La déformation est difficile, par contre la périphérie est libre, et peut se déformer aisément créant ainsi les pliures.

Au contraire, la courbure concave est en appui seulement sur une partie de la périphérie (le coin de l'échantillon) ; le matériau est alors plus flexible autour de sa zone d'appui et la déformation est facilitée.

L'hypothèse de cette première simulation qui consiste à négliger le support, n'est pas négligeable, son influence sera analysée dans le prochain paragraphe.

B.III.3 - Simulation de l'ensemble du procédé de courbure

La simulation précédente a permis de déterminer le rayon minimum accessible pour une pression appliquée. Dans ce second modèle, la courbure est effectuée sur un support courbé à un rayon fixée à 40 mm. La pression appliquée permet de contraindre le composant sur le support ce qui correspond au procédé réalisé dans les expériences.

L'objectif de cette partie est d'évaluer le nombre de pliures et leurs amplitudes, en fonction de la valeur de la pression appliquée et de la présence du support.

B.III.3.1 - Description de la simulation

La simulation utilise les hypothèses des plaques minces avec de grandes déformations. La structure d'étude est le quart du composant et les dimensions correspondent aux échantillons de l'analyse expérimentale ; ce sont des carrés de silicium de 10x10 mm², étudiés avec des épaisseurs de 15 µm à 50 µm. Les pressions appliquées varient de 1 kPa à 500 kPa.

Les conditions aux limites sont équivalentes à celles de la simulation précédente. Pour la courbure convexe, le composant est au contact du support par son centre en un point. Pour la

mise en forme concave, les quatre coins du composant sont en contact avec le support (Figure B-54).

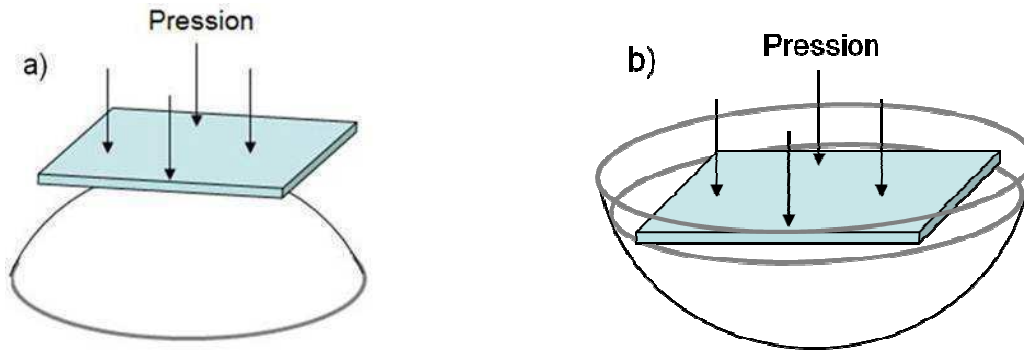


Figure B-54 : Simulation mécanique avec le support : a) Courbure convexe ; b) Courbure concave

Etant donné que les déformations maximales apparaissent en configuration convexe, je vais me concentrer sur cette orientation, afin d'évaluer l'influence conjointe de la pression et du support sur le résultat de courbure.

B.III.3.2 - Résultats pour une épaisseur de 50 μm

La première simulation est réalisée sur des structures de 50 μm d'épaisseur. Lorsque la pression exercée augmente, le rayon de courbure de l'échantillon diminue et tend vers celui du support (Figure B-55). La convergence est obtenue rapidement et les pressions nécessaires sont faibles et technologiquement réalisables. L'application d'une force équivalente à 500 kPa courbe l'échantillon avec un écart de 0,5 % par rapport au rayon du support.

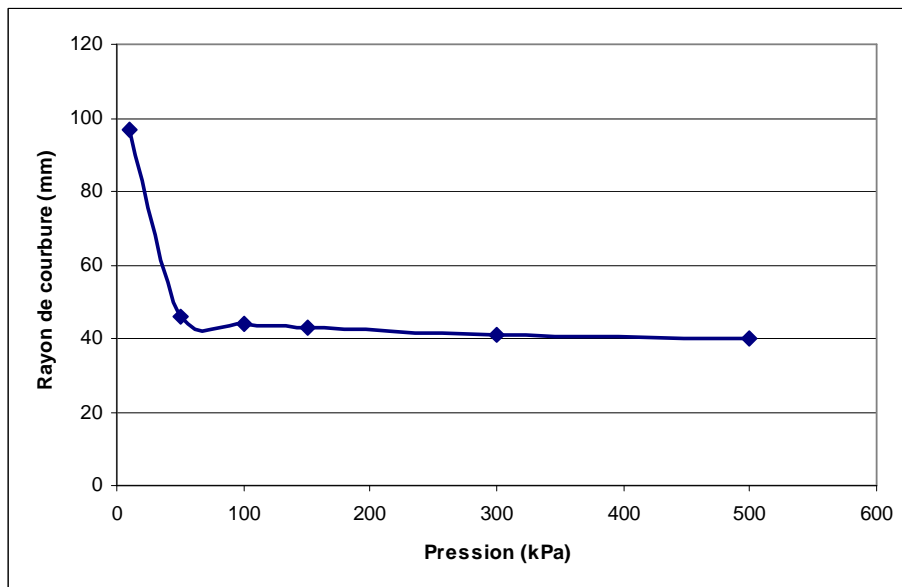


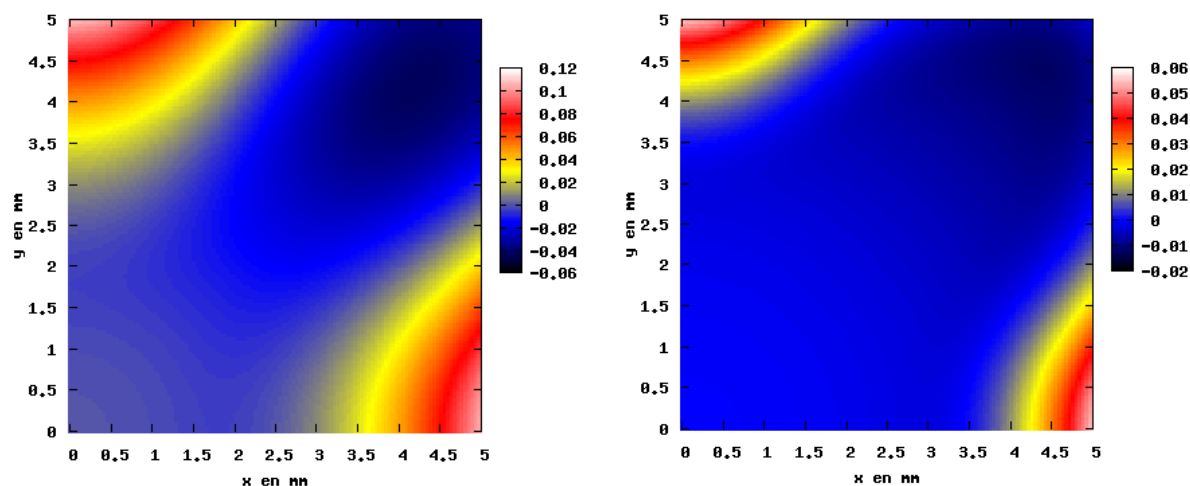
Figure B-55 : Convergence du rayon de courbure avec la pression
Silicium carré 10x10 mm² épaisseur 50 μm

Pour les pressions utilisées dans l'étude matériau, l'écart obtenu en simulation est de 3 mm. Cette valeur correspond aux expériences menées avec un procédé partiellement optimisé. L'étude matériau a, quant à elle, montré un écart inférieur au millimètre (1 % à 2 %) ; en

simulation, les résultats similaires sont obtenus pour une pression deux fois plus élevée. Cette différence de comportement prouve que la simulation n'est pas identique à l'expérience menée. Notamment, l'outil de courbure, utilisé dans l'expérience et qui n'est pas simulé, permet de contraindre plus fortement l'échantillon sur le support et diminuer ainsi cet écart.

B.III.3.2.1 - Résultats de courbure

La Figure B-56 montre l'écart à la sphère parfaite obtenue lors d'une mise en forme avec les deux pressions suivantes : 50 kPa et 300 kPa.



A : Pression 50 kPa – Rayon 45,7 mm

B : Pression 300 kPa – Rayon 41,06 mm

Figure B-56 : Résultats des déformations des échantillons courbés en convexe
Echantillon de 10x10 mm² épaisseur 50 μ m - Simulation pour $\frac{1}{4}$ échantillon

Les figures présentent les mêmes défauts de surface observés lors de l'étude matériau et de la simulation précédente. L'amplitude de ces pliures diminue lorsque la pression augmente et lorsque le rayon tend vers celui du support ; elle varie de 100 μ m à une dizaine de microns lorsque le rayon diminue de 14 % et tend vers le rayon théorique de 40 mm. Pour les pressions appliquées lors des expériences (proche de la pression simulée de 50 kPa), ces défauts mesurent entre 80 μ m et 100 μ m, et sont identiques aux résultats obtenus ; un exemple d'échantillon courbé expérimentalement à 40 mm est présenté à la Figure B-57. L'amplitude moyenne de ces pliures est de 95,5 μ m.

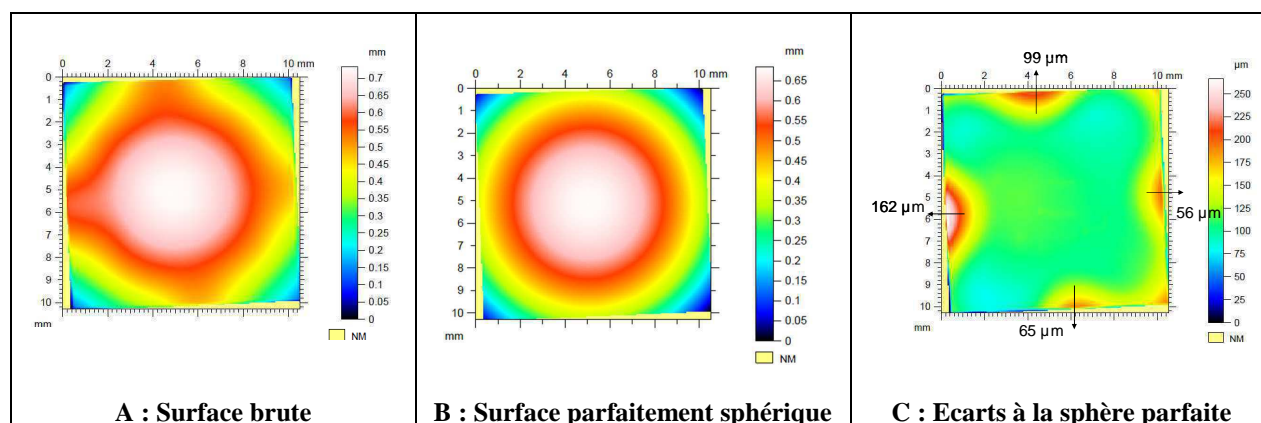


Figure B-57 :Caractérisation au profilomètre d'un carré de silicium courbé en convexe à 40 mm

Ainsi, la présence du support dans la technique de mise en forme permet de diminuer les amplitudes des pliures. Pour une pression six fois supérieure, l'amplitude des défauts est divisée par deux. Mécaniquement, ce comportement s'explique par la structure réalisée. L'échantillon, pris entre deux interfaces, peut difficilement se déformer.

B.III.3.2.2 - Valeurs de contraintes

Ces simulations permettent d'obtenir les valeurs de contrainte de la plaque. Considérant le rapport de forme de la structure, les contraintes dans l'épaisseur du matériau sont négligées ; les contraintes évaluées seront prises en surface et nous utiliserons le critère de von Mises, qui détermine la contrainte équivalente en un point (glossaire).

La contrainte maximale mesurée sur la surface, correspond aux zones fortement déformées c'est-à-dire aux pliures. Le Tableau B-7 présente ces valeurs en fonction de la courbure.

Pression appliquée	Rayon du silicium	Contrainte von Mises maximale
10 kPa	97,4 mm	137 MPa
50 kPa	45,7 mm	209 MPa
100 kPa	44,0 mm	221 MPa
150 kPa	42,9 mm	238 MPa
300 kPa	41,1 mm	265 MPa
500 kPa	40,2 mm	292 MPa

Tableau B-7 : Contraintes maximales mesurées sur les échantillons

Les contraintes maximales augmentent avec la courbure. Néanmoins la gamme de variation est faible. Un gain de 5 mm sur le rayon augmente la contrainte de 80 MPa. De plus, ces valeurs sont inférieures à la limite de rupture du silicium qui, selon sa nature intrinsèque, évolue entre 3 GPa et 9 GPa.

Ces simulations montrent donc que la contrainte due à la mise en forme sphérique varie faiblement et n'atteint pas la valeur de rupture du matériau.

B.III.3.3 - Influence de l'épaisseur

La même analyse est menée sur des échantillons de silicium de 25 μm et 15 μm d'épaisseur, afin de déterminer l'influence de l'épaisseur sur la qualité de la surface sphérique obtenue.

Lorsque l'épaisseur diminue, la force nécessaire à la mise en forme sphérique est plus faible. Elle est divisée par dix pour des échantillons de 15 μm par rapport à ceux de 50 μm . Le même type de déformations est observé sur les échantillons d'épaisseur variable (Figure B-58).

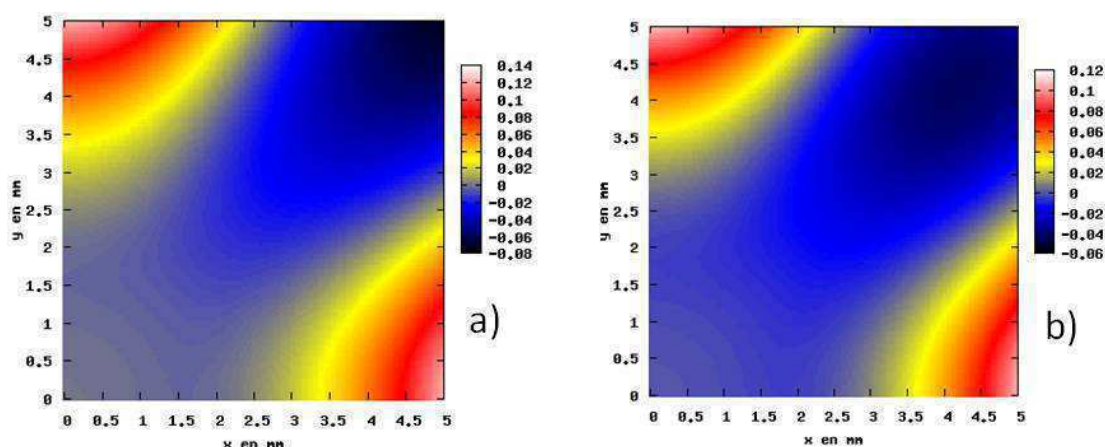


Figure B-58 : Comparaison des échantillons de 15 μ m et 50 μ m d'épaisseur courbés à un rayon de 45 mm
a) Pression 8 kPa – 15 μ m d'épaisseur ; b) Pression 50 kPa – 50 μ m d'épaisseur

Pour un rayon de 45 mm et selon les épaisseurs de l'échantillon de silicium, le Tableau B-8 présente la pression nécessaire pour obtenir cette courbure, l'amplitude des pliures et la contrainte en ces zones (contrainte maximale de la surface).

Epaisseur d'échantillon	Pression appliquée	Amplitude des pliures	Contrainte von Mises
50 μ m	50 kPa	108 μ m	209 MPa
25 μ m	20 kPa	110 μ m	140 MPa
15 μ m	10 kPa	124 μ m	102 MPa

Tableau B-8 : Comparaison des simulations pour un rayon de 45 mm

Lorsque l'épaisseur diminue, ce tableau confirme que la pression nécessaire pour obtenir un même rayon de courbure, diminue également ; par contre l'amplitude des pliures augmente. Il est intéressant de noter que la contrainte mesurée sur ces échantillons diminue fortement avec l'épaisseur ; de 50 μ m à 15 μ m, la contrainte est divisée par deux.

Cette même analyse peut être menée sur des échantillons courbés à un rayon plus faible, 41 mm (Tableau B-9).

Epaisseur d'échantillon	Pression appliquée	Amplitude des pliures	Contrainte von Mises
50 μ m	300 kPa	50 μ m	265 MPa
25 μ m	100 kPa	90 μ m	217 MPa

Tableau B-9 : Comparaison des simulations pour un rayon de 41 mm

Une pression plus importante doit être appliquée afin d'atteindre ce rayon. On observe le même comportement des paramètres (pression, amplitude, contrainte) avec la diminution de l'épaisseur. La force appliquée étant plus importante, les amplitudes des pliures sont plus faibles. L'échantillon de 50 μ m d'épaisseur présente une surface moins déformée ; la variation d'amplitude des pliures entre ces deux épaisseurs d'échantillons est de 40 μ m.

Les contraintes mesurées augmentent lorsque le rayon de courbure diminue (comparaison des tableaux B-8 et B-9). Les échantillons de silicium amincis à 50 μm sont plus contraints mais ces valeurs restent inférieures à la limite de rupture du silicium.

Epaisseur, orientation & courbure

L'épaisseur influe sur le comportement des échantillons de silicium lors de la mise en forme sphérique. Lorsque l'épaisseur augmente, les pliures sont plus importantes, mais leur nombre augmente moins rapidement lorsque le rayon diminue. Etant donné que l'objectif de la thèse est de diminuer au maximum la déformation du silicium, l'épaisseur adéquate d'amincissement du substrat est de 50 μm . Par contre, la contrainte mesurée à cette épaisseur est plus importante, ce qui augmente le risque de clivage, même si les contraintes simulées sont inférieures à la limite de rupture. Afin de s'éloigner de cette valeur, il est donc possible de diminuer l'épaisseur, ce qui serait obtenu au détriment de l'état de surface.

Ainsi l'épaisseur est un compromis entre la contrainte dans le matériau et la surface parfaitement sphérique. Ce choix dépend du rayon de courbure souhaité ; typiquement 40 mm pourrait être une valeur seuil, pour diminuer l'épaisseur.

Ces simulations numériques vérifient les conclusions de l'étude matériau et permettent de fournir des explications quant aux résultats observés :

- la différence obtenue selon l'orientation de la courbure s'explique par les conditions aux limites différentes selon les procédés,
- la courbure concave est mécaniquement favorable : une faible pression permet d'obtenir une plus forte courbure qu'en convexe et la surface est parfaitement sphérique. Le symétrique du procédé pourrait être réalisé en convexe afin d'empêcher la formation de pliures. Une solution serait d'adapter l'outil de courbure afin de contraindre en premier lieu la périphérie de l'échantillon puis progressivement l'ensemble de la structure,
- l'application d'une contrainte importante permet de réduire les écarts au rayon du support ainsi que la diminution des amplitudes des pliures,
- une diminution de l'épaisseur permet d'atteindre de faibles rayons de courbure avec de faibles pressions, mais les déformations ne sont pas diminuées ; au contraire, une épaisseur de 50 μm permet d'obtenir des amplitudes de défaut plus faibles.

Conclusion du deuxième chapitre

Deux techniques de mise en forme sphérique ont été envisagées. La première consiste à structurer le composant en de petits groupes fonctionnels ; l'interconnexion permet de gagner en flexibilité et de courber avec de très faibles rayons de courbure. Cette solution est intéressante pour réaliser des caméras miniatures qui se basent sur une architecture multivoie inspirée de la vision des insectes. Pour corriger les aberrations de courbure de champ, la structure du détecteur doit être conservée et la courbure doit donc être réalisée sur la totalité du composant. Pour obtenir une telle courbure, il est nécessaire d'amincir le substrat.

Un procédé de courbure a été développé pour répondre à cette problématique. La mise en forme sphérique est faite sur un support qui permet de fixer le rayon, de conserver la courbure et d'intégrer le composant courbé selon la procédure standard. Ce procédé se base sur deux contacts mécaniques. Le premier correspond à l'application progressive d'une force sur l'échantillon, et le deuxième se situe entre l'échantillon et le verre support.

Ces deux interfaces doivent être maîtrisés afin d'obtenir une qualité de courbure optimale. Les critères de réussite ont été définis afin de caractériser l'écart à la sphère ; quatre facteurs ont été quantifiés : l'obtention d'un faible écart (inférieur à 1 mm) entre le rayon de courbure du support et celui de l'échantillon, une surface sans déformation (absence de pliure), un écart à la sphère nul (voire inférieur à 3 %), qui est obtenue par la mesure du rayon moyen et la maximisation de la surface parfaitement sphérique (minimum 50 % de la surface).

L'état de surface de l'échantillon courbé dépend de deux paramètres : la qualité du support, qui n'est qu'un artefact du choix du support pour cette étude matériau et l'outil de courbure. Les déformations observées diffèrent selon l'orientation de la courbure. Pour une courbure convexe, la déformation est le relevé de l'extrémité des médianes qui diminue la surface parfaitement sphérique. La courbure concave, quant à elle, ne présente pas de déformation.

Les simulations effectuées corroborent ces résultats d'expérience. La même différence d'état de surface est obtenue sur les courbures concave et convexe. La technique de mise en forme, et notamment les conditions aux limites, explique ces résultats.

Cette étude matériau a donc permis de développer et de caractériser le procédé de courbure qui peut alors être transféré aux détecteurs infrarouge. L'épaisseur des composants a été fixée à 50 μm . Le chapitre suivant est consacré au transfert de ce procédé aux détecteurs fonctionnels : détecteurs infrarouge refroidis à base de CdHgTe et microbolomètres.

CHAPITRE C : LA COURBURE DE DETECTEURS

Introduction

Les composants d'étude de cette thèse sont des imageurs infrarouge qui sont réalisés au sein du département optronique du CEA Létì. L'infrarouge est un rayonnement électromagnétique découvert en 1800 par Sir Frederick William Herschel. Il a été mis en évidence sur le spectre solaire en mesurant une élévation de température au-delà des longueurs d'onde qui correspondent au rouge (Figure C-1).



Figure C-1: La détection du rayonnement infrarouge par Sir Frederick William Herschel

Tout corps émet un rayonnement thermique, dont l'énergie est proportionnelle à sa température et ses propriétés intrinsèques. Le processus d'émission est lié à l'agitation thermique interne de la matière, générant des transitions radiatives d'énergie E .

On exprime l'émission thermique des solides par la notion de corps noir. Par définition, c'est un corps parfait qui absorbe totalement tout rayonnement incident quelles que soient la longueur d'onde et la direction de propagation. Ce corps peut également émettre des radiations à toutes les longueurs d'onde, d'après la définition donnée par Gustav Kirchhoff.

L'émission spectrale dépend de la longueur d'onde selon la loi de Planck (Équation C-1) qui détermine la luminance c'est-à-dire la puissance du rayonnement par unité de surface. La longueur d'onde d'émission est définie pour le flux maximum ; selon la loi de Wien (Équation C-2), elle est inversement proportionnelle à la température du corps noir (Figure C-2).

$$L_{\lambda(W.m^{-2}.sr^{-1})} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right)^{-1}$$

Équation C-1 : Equation de Planck

Avec :

h : constante de Planck = $6,63.10^{-34} J.s$

c : célérité = $299\,792\,458 m/s$

k : constante de Boltzmann = $1,38.10^{-23} J/K$

λ : longueur d'onde

T : température (K)

$$\lambda_{\max(\mu m)} = \frac{2898 \mu m.K^{-1}}{T \text{ en } K}$$

Équation C-2 : Loi de Wien

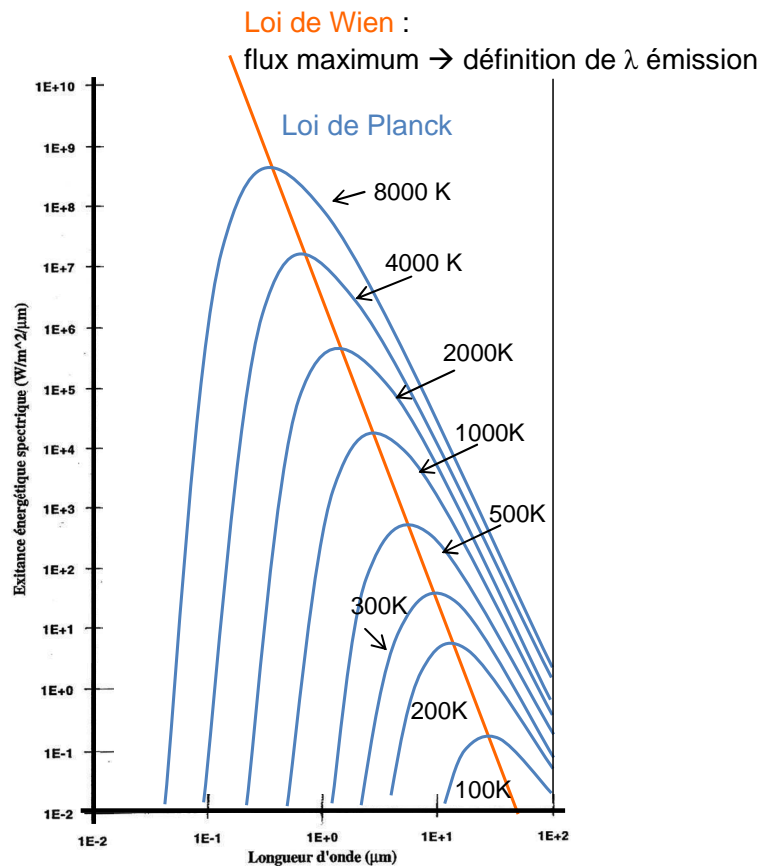


Figure C-2 : Courbes de Planck et loi de Wien pour des températures de corps noir de 100 K à 8000 K
L'exitance énergétique spectrique est l'intégrale de la luminance sur un angle solide 2π stéradians

Le rayonnement infrarouge couvre un large domaine du spectre électromagnétique (Figure C-3). Les longueurs d'onde sont comprises entre $0,75 \mu m$ et $1 mm$. Le rayonnement infrarouge est en partie absorbé par l'atmosphère et notamment par la vapeur d'eau et le gaz carbonique. Il en découle des bandes de transmission, appelées fenêtres, qui découpent le large domaine de longueurs d'onde en trois principales régions :

- les courtes longueurs d'onde entre 0,75 μm et 2,5 μm : bande SWIR (Short Wavelength InfraRed),
- les moyennes longueurs d'onde entre 3 μm et 5 μm : bande MWIR (Middle Wavelength InfraRed),
- les grandes longueurs d'onde entre 8 μm et 12 μm : bande LWIR (Long Wavelength InfraRed).

Les longueurs d'onde au-delà de 15 μm (VLWIR : Very Long Wavelength InfraRed) sont absorbées par l'atmosphère ; cette gamme est dédiée aux applications spatiales.

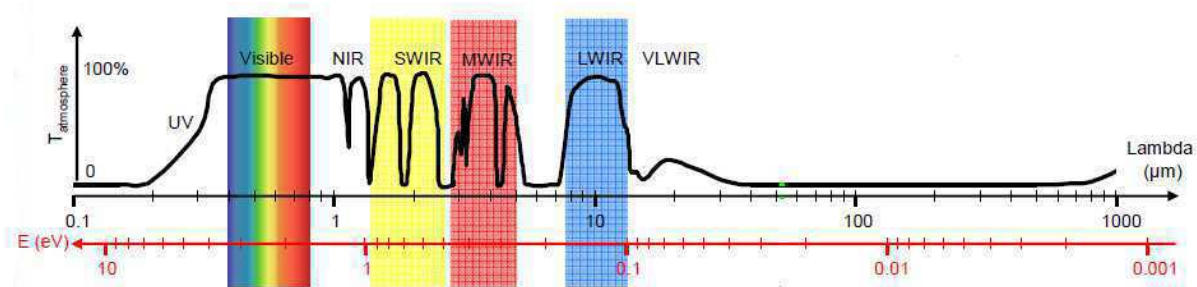


Figure C-3 : Bandes de transmission du domaine infrarouge

Le principe de détection est le suivant : le rayonnement émis par l'objet est absorbé par un matériau sensible, dont une de ses grandeurs physiques évolue avec l'énergie infrarouge des photons incidents. La variation de cette grandeur permet de remonter à l'intensité du rayonnement. En effet, l'émittance M , qui est le rapport du flux lumineux émis par unité de surface S , est proportionnelle à la température du corps T (Équation C-3) selon la loi de Stephan. Une image thermique de l'objet peut donc être obtenue.

$$M = \sigma T^4$$

Équation C-3 : Loi de Stephan

Deux catégories de détecteurs se distinguent : thermique et photonique. Au département optronique, ces deux types sont développés au sein de deux différentes filières : les microbolomètres et les détecteurs photovoltaïques en CdHgTe (G. Destefanis 2006).

Les microbolomètres sont les plus répandus dans la catégorie des détecteurs thermiques. Le principe repose sur la mesure de l'élévation de température, par la variation de conductivité du matériau sensible due à l'absorption du rayonnement infrarouge. Ils sont peu sensibles à la longueur d'onde et donc peu sélectifs.

Dans le cas des détecteurs photovoltaïques, le rayonnement infrarouge est absorbé par un matériau semi-conducteur, le CdHgTe, sensible aux longueurs d'onde infrarouge. Les photons incidents excitent le matériau créant un photocourant qui est directement proportionnel au flux infrarouge incident.

Ce travail de thèse a été réalisé sur les deux types de détecteurs infrarouge : les microbolomètres utilisés dans la bande 8 μm – 12 μm , et les détecteurs quantiques CdHgTe dans la bande 3 μm – 5 μm . Le point commun entre ces deux détecteurs est le circuit de lecture CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) en silicium. Cependant, la structure et la composition du circuit de détection sont différentes. Les microbolomètres ont une matrice sensible en silicium fabriquée sur le CMOS. Le circuit de détection des

composants photovoltaïques est une matrice de diodes réalisée dans le CdHgTe hybridée sur ce circuit de lecture CMOS. L'étape d'hybridation consiste à connecter par une brasure d'indium les deux circuits.

La courbure de ces imageurs nécessite donc de courber, dans tous les cas, le circuit de lecture CMOS, majoritairement constitué de silicium. Le potentiel de courbure de ce matériau aminci a été présenté dans le chapitre précédent. J'ai démontré qu'il était possible de le courber sans initier de clivage. Il reste néanmoins à transposer ces travaux sur CMOS. Ce composant est constitué d'un substrat de silicium avec une couche active composée notamment d'isolants, de métallisations et de passivations. Ces différents matériaux ont des propriétés mécaniques différentes du silicium. Par conséquent, le potentiel de courbure de ce circuit doit être réévalué avant de transférer ces travaux sur les imageurs fonctionnels.

L'étude de la courbure du circuit Si-CMOS sera exposée dans la première partie de ce chapitre. La partie suivante présentera les premiers travaux liés à la courbure des détecteurs infrarouge refroidis, et la dernière partie sera consacrée aux microbolomètres.

C.I - Courbure du circuit de lecture Si-CMOS

Depuis les années 1960, l'industrie de la microélectronique connaît un formidable essor basé essentiellement sur le développement des transistors de type MOS. MOS est l'acronyme pour Métal Oxyde Semi-conducteurs qui sont les constituants de cette structure. Le premier circuit intégré en 1961 est constitué seulement de quatre transistors pour atteindre en 1971, deux mille trois cents transistors ; Intel crée ainsi le premier microprocesseur (Kilby 1976). Cette croissance exponentielle suit la loi de Gordon Moore qui stipule que le nombre de transistors sur une puce de même taille double tous les dix huit mois (Schaller 1997).

La technologie CMOS (Complementary Metal Oxide Semi-conductor), inventée en 1963, améliore la densité d'intégration et le rendement par sa structure particulière. Le CMOS est un composant unitaire constitué de deux structures MOS accolées qui sont dopées respectivement en électrons (MOS type n) et en trous (MOS type p). Ces structures ont donc un fonctionnement complémentaire : l'une est bloquée lorsque l'autre est passante. L'agencement de ces structures permet de réaliser des fonctions logiques (inverseur, fonction ET, OU...). Par extension, CMOS désigne également tous les circuits constitués de ce composant unitaire. Par exemple, les microprocesseurs sont appelés CMOS, mais contiennent également d'autres fonctions telles qu'une mémoire, une horloge...

Ce composant est à la base de nombreux circuits intégrés qui adressent des applications variées comme l'électronique, les télécommunications, le calcul, le transport. Des architectures CMOS spécifiques permettent également de faire de l'imagerie dans le domaine visible (El Gamal & Eltoukhy 2005), ou le terahertz (Schuster et al. 2011).

Dans le domaine infrarouge, les circuits CMOS permettent de collecter, transférer, mettre en forme le courant proportionnel au rayonnement infrarouge de chaque pixel. Après un traitement du signal approprié, la cartographie des intensités permet de recréer la scène infrarouge observée.

C.I.1 - Adaptation du procédé de courbure pour les circuits fonctionnels

Ces circuits CMOS composent les deux types de détecteur infrarouge ; par conséquence, leur courbure est un jalon incontournable de notre dispositif final. Le procédé de courbure a été développé de telle sorte que les composants courbés soient similaires après courbure aux composants standards. Ainsi, les étapes d'intégration en boîtier sont conservées à l'identique afin de faire de ce nouveau composant un imageur fonctionnel.

Pour comprendre la nécessité des adaptations qui seront apportées au procédé de courbure, le procédé d'intégration va être détaillé.

C.I.1.1 - Intégration du composant

Le procédé d'intégration consiste à connecter électriquement le composant à un instrument de mesure pour former l'image infrarouge de la scène. Cette connexion est réalisée par l'intermédiaire du circuit CMOS, qui assure le traitement de l'image pour les deux types d'imageurs.

Dans les caméras de laboratoire, ce composant est câblé sur une céramique de routage qui est connectée aux instruments de mesure par une limande. Pour cela, les circuits de lecture Si-CMOS ont sur la périphérie des plots d'interconnexion (Figure C-4) reliés par des fils d'or (technique de câblage filaire) aux lignes métalliques de la céramique. La complexité du câblage diffère selon le type de détecteur. Les circuits de lecture des détecteurs quantiques exploités ont deux rangées périphériques de plots (Figure C-4), alors que les microbolomètres en ont quatre.

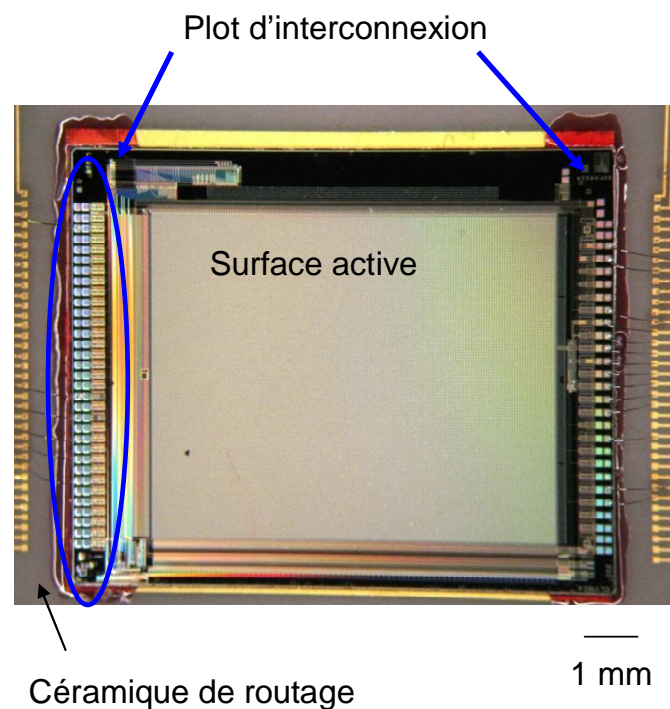


Figure C-4 : Intégration des circuits sur la céramique de routage par le câblage des plots d'interconnexion

Le composant, reporté sur ce support intermédiaire, est placé dans un environnement thermique contrôlé ; les imageurs refroidis sont placés dans un cryostat et les microbolomètres dans une enceinte thermique sous vide (ETSV, Figure C-5). Cet environnement lié à la détection infrarouge sera détaillé dans le chapitre D.

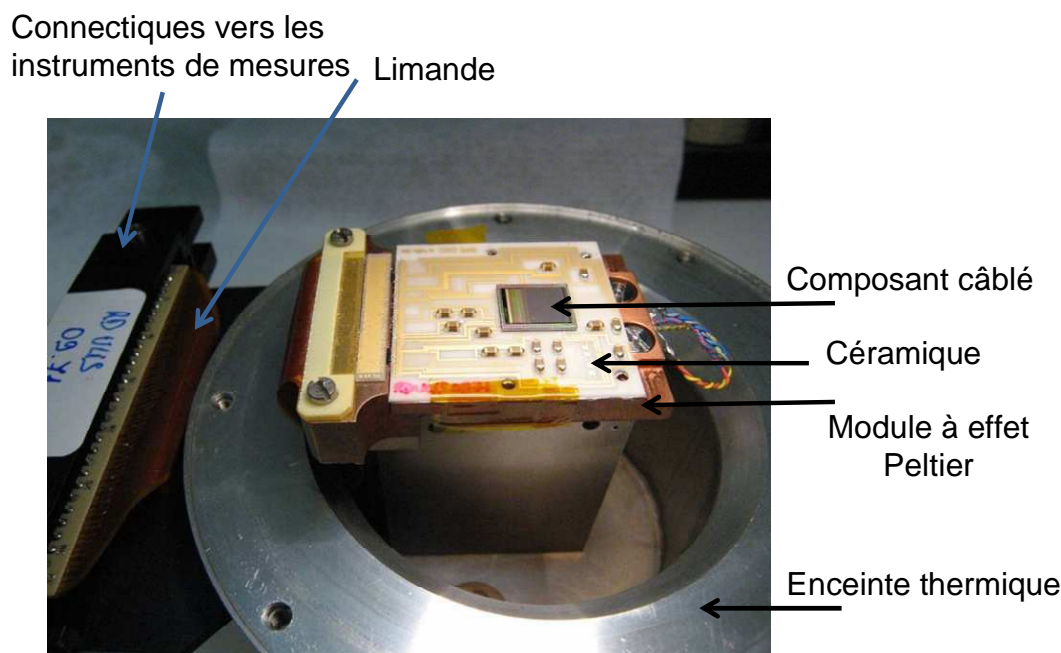


Figure C-5 : Intégration dans l'environnement thermique : ETSV ouvert avec un bolomètre câblé

L'intégration nécessite donc le collage et le câblage du composant sur la céramique. Le composant courbé est reporté sur un verre support. Cette structure permet de manipuler le composant aminci ; néanmoins, cet élément supplémentaire nécessite de légères modifications du procédé d'intégration.

C.I.1.2 - Adaptation de l'étape de report sur céramique

La première difficulté est le report du support courbé sur la céramique. Les supports de courbure sont des verres de montre de diamètre 40 mm et 60 mm. Ces dimensions sont largement supérieures à la taille de la céramique.

Dans un premier temps, il a donc fallu adapter le support à la taille du détecteur, approximativement de 11x12 mm². Afin de pouvoir le positionner correctement, les verres sont découpés à 12x14 mm² (Figure C-6). La découpe du verre semble une activité aisée qui finalement s'avère complexe, dès lors que l'épaisseur est importante et qu'il faut prendre en compte l'environnement microélectronique. L'équipement utilisé est une machine de découpe (Disco). La méthode consiste à le découper, par passes successives, afin de définir un rectangle centré sur le sommet du verre convexe. Sept passes ont été nécessaires pour chaque chemin de découpe. Ainsi, le verre support présente des dimensions adaptées à la taille du composant.

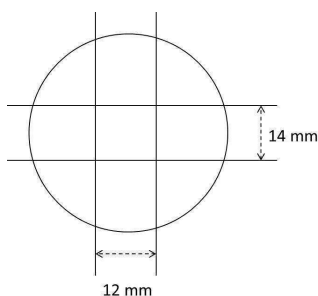


Figure C-6 : Découpe du verre support

Le composant courbé sur ce support est ensuite reporté sur la céramique en utilisant un film adhésif. Contrairement au composant standard, le collage est effectué entre une surface courbe (le verre support) et une surface plane (la céramique). Ce point ne constitue pas une difficulté technologique majeure, cependant elle implique une différence de comportement thermique entre le composant épais plan et le composant courbé. Dans l'enceinte thermique, les bolomètres sont reportés sur un module à effet Peltier plan (Figure C-7) qui régule leur température. Cet échange thermique est facilité entre deux surfaces planes, alors que la surface de verre et la courbure générée le détériorent.

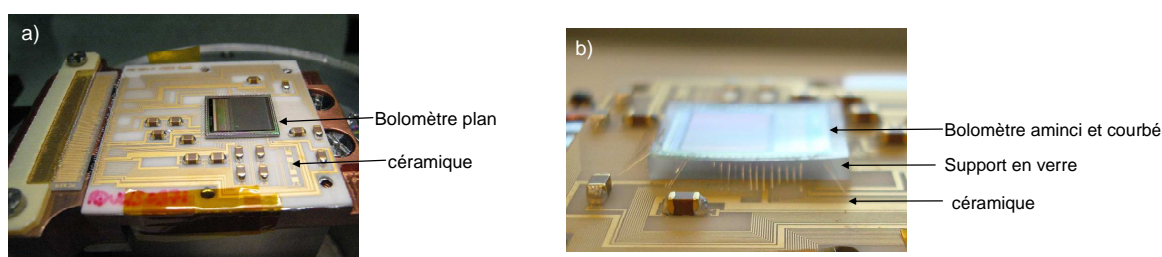


Figure C-7 : Différence d'intégration d'un composant standard plan et courbé

C.I.1.3 - Adaptation de l'étape de câblage

La deuxième difficulté concerne le câblage de ces circuits. En effet, l'outil de l'équipement est prévu pour connecter deux surfaces planes, mais les plots d'interconnexion sont, eux, répartis sur une surface courbée. Néanmoins, cette inclinaison à l'échelle de ces plots est suffisamment faible pour que la tolérance de l'outil permette un câblage standard. Cette étape reste cependant délicate : la pression exercée par l'outil peut créer des amorces de clivage et ainsi fracturer le composant.

D'autre part, lors de la courbure, des débordements de colle peuvent remonter sur le composant et dégrader l'état de surface. Lors de l'étude d'échantillons de silicium, seule la caractérisation du résultat de courbure au profilomètre mécanique était faussée, alors que pour les composants fonctionnels, le comportement électrique peut être perturbé. Le débordement de colle se situe principalement sur la périphérie de l'échantillon rendant impossible la soudure des fils. La surface du composant doit donc être protégée. Un film adhésif est déposé sur les couches actives. Ses dimensions doivent être identiques à la taille du composant afin de protéger toute la surface. Ce film est largement utilisé dans les procédés de microélectronique ; il est donc compatible avec le procédé de courbure.

La protection est effectuée sur le composant aminci qui est ensuite courbé et collé. De plus, l'avantage principal de ce film est sa perte d'adhérence lorsqu'il est plongé dans l'acétone.

Cette caractéristique permet de l'enlever facilement après la mise en forme sphérique du composant. La surface courbée est alors parfaitement propre.

En réalité, les modifications du procédé de courbure, développé avec les échantillons de silicium, sont mineures. L'adaptation principale concerne le gabarit des verres supports. Le film de protection de la surface était également utilisé dans l'étude matériau pour préserver l'état de surface lors des caractérisations au profilomètre.

C.I.2 - Courbure du Si-CMOS

L'objectif de cette étude est de déterminer la gamme de rayons accessibles pour ce type de circuit. Les Si-CMOS de cette étude sont des composants sur étagère, normalement utilisés pour hybrider les circuits de détection photovoltaïque CdHgTe.

L'étude matériau a montré que l'échantillon de silicium aminci pouvait être courbé jusqu'à des rayons de 38 mm. Cependant, les circuits Si-CMOS diffèrent des composants silicium de l'analyse matériau par deux caractéristiques :

- la technique d'amincissement,
- la fonctionnalisation de la surface.

Ces deux points tendent à diminuer le potentiel de courbure par rapport à la courbure du silicium nu. Avant de présenter les résultats expérimentaux de courbure, nous allons les détailler.

C.I.2.1 - Evaluation du circuit Si-CMOS par rapport au silicium nu

C.I.2.1.1 - Amincissement

Les circuits Si-CMOS sont amincis unitairement au sein du département ; l'épaisseur finale visée est de 50 μm d'après les conclusions de l'étude silicium. Cet amincissement est obtenu manuellement par un rodage avec une solution composée de grains de carbure de silicium ; puis une solution diamantée permet de diminuer les défauts cristallins créés. L'état de surface du CMOS diffère donc des tranches de siliciums amincis industriellement chez Disco qui utilise des étapes de déstressage ; les dégradations dans le matériau, créées par le polissage à sec, sont éliminées par des étapes plus douces comme le plasma et la chimie.

L'état de surface final des CMOS est proche d'un état poli miroir. Néanmoins, des défauts cristallins subsistent en surface et le circuit présente une voilure. Les images de la Figure C-8 montrent le circuit après amincissement. Il apparaît une déformation cylindrique dont le rayon de courbure est égal à 100 mm. Ces contraintes résiduelles n'étaient pas présentes dans l'étude matériau du silicium nu.

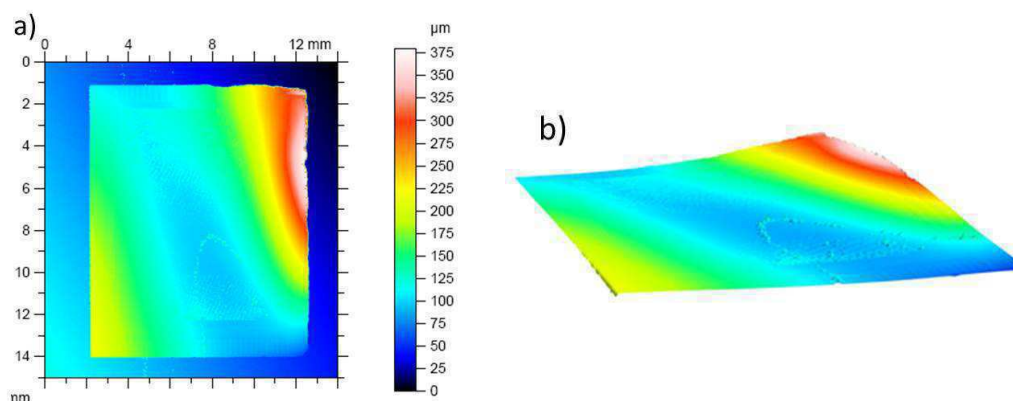


Figure C-8 : Caractérisation au profilomètre optique du circuit CMOS après amincissement
a) Surface brute, le fond bleu est la référence plane et b) CMOS en 3D

C.I.2.1.2 - *Evaluation analytique du potentiel de courbure*

L'étude analytique de la courbure a été menée sur des échantillons de silicium nu. Le circuit CMOS s'en différencie par sa structure (couche active d'une dizaine de microns). Ses propriétés mécaniques diminuent la contrainte à la rupture du matériau et donc avec elle le potentiel de courbure. En effet, outre l'orientation cristalline (Hu 1982), la composition du matériau influe également sur cette contrainte critique. La référence (Johansson et al. 1989) montre une diminution d'un facteur 5 de la contrainte de rupture entre un silicium nu et un silicium composé d'une couche de TiN inférieure à 1 μm , et une diminution d'un facteur 2, avec un dépôt de SiO_2 de 500 nm sur la surface du silicium. Ainsi les propriétés mécaniques intrinsèques du circuit CMOS sont moins favorables à la courbure que les échantillons de silicium.

Le polissage manuel de ces circuits diminue également la contrainte à la rupture (Yang et al. 2009). De plus, du fait de cette technique, des amorces de clivage peuvent être créées fragilisant ainsi la structure.

C'est pourquoi les rayons accessibles avec le circuit Si-CMOS seront finalement plus importants que ceux obtenus au cours de l'étude matériau menée sur des échantillons de silicium.

C.I.2.2 - **Résultats de courbure Si-CMOS**

Les Si-CMOS sont courbés sur les verres de montre, ce qui permet d'avoir accès à différents rayons de courbure et aux deux orientations. Le procédé est similaire à la courbure du silicium, les verres supports sont choisis afin de déterminer le rayon ciblé ; les circuits sont ensuite courbés et analysés.

Etant donné que la surface est fonctionnelle, elle ne doit pas être dégradée par le passage de la pointe du profilomètre mécanique. Ainsi, la caractérisation est faite avec une sonde optique qui sera également utilisée pour tous les composants fonctionnels de ma thèse. Cependant, l'amplitude de mesure de la sonde est de 200 μm ; elle est donc plus faible que la course de la pointe mécanique (2 mm). Cette valeur de 200 μm est inférieure à la flèche des composants courbés qui varie de 350 μm à 500 μm (les rayons de courbure variant respectivement de 70 mm à 49 mm). De ce fait, la surface est balayée en quatre étapes successives : l'altitude de la sonde décroît progressivement à chaque analyse afin de couvrir toute la surface courbée. Les

surfaces sont ensuite assemblées pour former l'image de la Figure C-9 A. La Figure C-9 B représente la surface parfaitement sphérique et la Figure C-9 C, l'écart à la sphère parfaite. La technique d'assemblage peut expliquer certaines zones non mesurées, en jaune très clair, dans les figures.

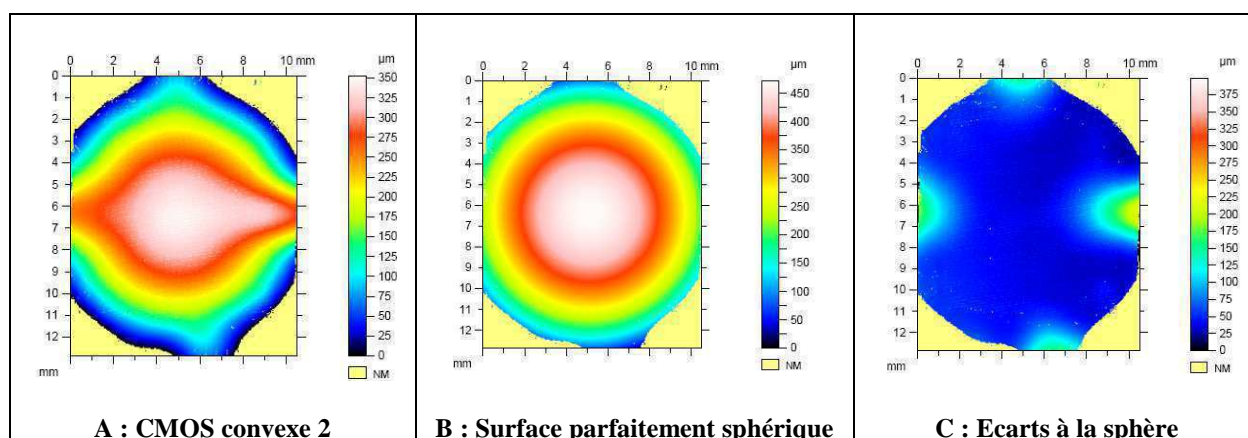


Figure C-9 : Caractérisation au profilomètre optique du circuit CMOS courbé en convexe
Les zones jaunes dans les coins sont des surfaces non mesurées (NM).

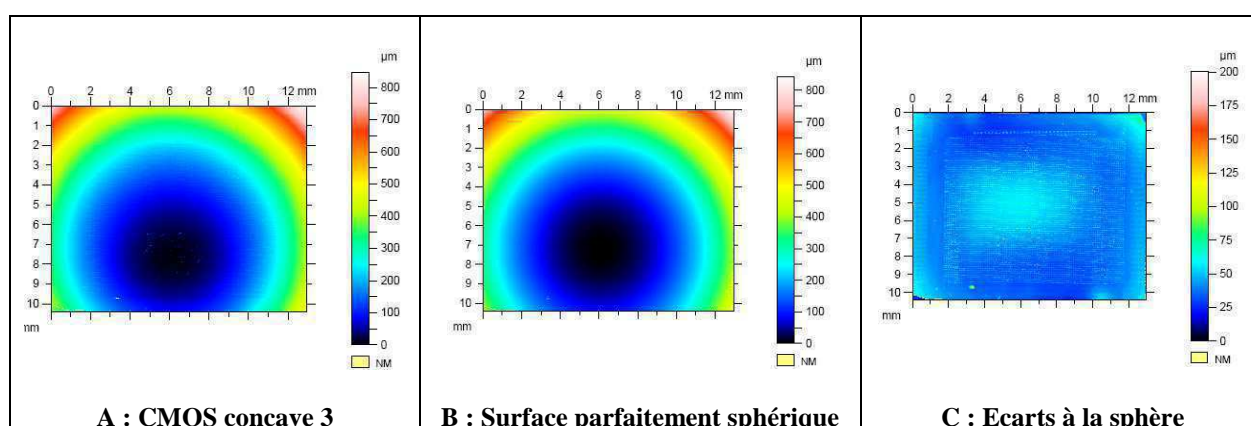


Figure C-10 : Caractérisation au profilomètre optique du circuit CMOS courbé en concave
Les zones jaunes dans les coins sont des surfaces non mesurées (NM).

Il apparaît que le CMOS convexe (Figure C-9) présente des pliures à la périphérie. L'amplitude des pliures est d'une centaine de microns correspondant aux valeurs mesurées sur les échantillons de silicium courbés en convexe. En concave, le CMOS est parfaitement sphérique (Figure C-10) ; aucune pliure n'apparaît sur la figure des écarts à la sphère (Figure C-10 C). Les résultats de courbure du circuit sont donc similaires aux expériences menées sur les carrés de silicium amincis (Chapitre B, partie III).

Le tableau ci-dessous (Tableau C-1) résume les essais effectués. Ces composants sont analysés selon le protocole de l'étude matériau. Les mêmes caractérisations sont étudiées et sont présentées dans le tableau :

- mesure de l'écart entre les rayons du verre support et du circuit courbé,
- nombre et amplitude des pliures.

Les rayons donnés sont les rayons de la sphère parfaite déduite de la surface balayée.

CMOS 11x12,5 mm ²	Rayon parfait du support	Rayon parfait du CMOS	Ecart entre rayon (ΔR) ou entre flèche (Δf) support / CMOS	Pliure
Convexe 1	54,9 mm	54,7 mm	$\Delta R = 0,16 \text{ mm}$ $\Delta f = 1 \text{ }\mu\text{m}$	4 pliures : 121 μm – 114 μm 136 μm – 177 μm
Convexe 2	51,4 mm	51,7 mm	$\Delta R = 0,33 \text{ mm}$ $\Delta f = 2 \text{ }\mu\text{m}$	4 pliures : 156,3 μm – 84 μm 145,9 μm – 123 μm
Concave 1	63,8 mm	58,7 mm	$\Delta R = 5 \text{ mm}$ $\Delta f = 24 \text{ }\mu\text{m}$	2 pliures : 103 μm – 107 μm
Concave 2	71,3 mm	69,7 mm	$\Delta R = 1,3 \text{ mm}$ $\Delta f = 6 \text{ }\mu\text{m}$	2 pliures : 140 μm – 146 μm
Concave 3	57,8 mm	58,8 mm	$\Delta R = 1 \text{ mm}$ $\Delta f = 5 \text{ }\mu\text{m}$	Pas de pliure

Tableau C-1 : Résultats de courbure des circuits Si-CMOS (précision de mesures des rayons +/- 75 μm)

La courbure convexe des Si-CMOS montre un écart faible dans les rayons de courbure ; les résultats sont similaires à l'étude matériau. Cependant, les amplitudes mesurées sont plus importantes en comparaison des pliures observées sur l'échantillon de silicium pour des rayons équivalents.

Dans le cas de la courbure concave, les écarts entre les rayons du CMOS et le rayon du verre support est de 1 mm à 2 mm. Certaines courbures sont moins réussies et présentent des pliures sur la périphérie. Notamment, le CMOS concave 1 a un écart de 5 mm. Il a été courbé en appliquant une pression trop faible, ce qui a favorisé les pliures et cet écart important. Au contraire, le CMOS concave 3 a été courbé avec une pression adaptée, et la courbure est similaire aux résultats expérimentaux sur les carrés de silicium (aucune pliure).

L'étude du potentiel de courbure des Si-CMOS n'a pas profité de tous les développements du procédé de courbure ni des conclusions de l'étude matériau (chapitre B- partie III). En effet, cette analyse a été réalisée en parallèle à l'optimisation du procédé. Ce tableau est donc une démonstration supplémentaire de l'importance des paramètres du procédé (outil, pression appliquée). Malgré ces écarts, la courbure du CMOS présente un comportement mécanique similaire aux résultats de courbure obtenus sur les échantillons de silicium. La courbure convexe présente des pliures en périphérie, alors que la courbure concave est plus favorable.

Résultats de courbure du Si-CMOS

Ces premiers tests mécaniques ont permis de déterminer le rayon limite de courbure en dessous duquel le circuit CMOS clive. La limite mécanique apparaît en convexe pour des rayons de courbure de 50 mm et 58 mm en concave. Ces rayons critiques sont supérieurs aux résultats obtenus sur les carrés de silicium où des rayons de 38 mm en convexe et 40 mm en concave ont été atteints sans obtenir de clivage. Cette dissimilitude peut s'expliquer par le procédé de courbure utilisé, qui n'est pas celui optimisé de l'étude matériau.

Les rayons critiques du circuit Si-CMOS sont obtenus pour des échantillons de 50 μm d'épaisseur, amincis avec un procédé unitaire. Il est donc possible de diminuer ce rayon critique grâce à deux leviers technologiques :

- l'optimisation de la technique d'amincissement. Un amincissement collectif des tranches de silicium permettra de réduire les contraintes intrinsèques (défauts cristallins initiés par le polissage à sec), et ainsi diminuer le rayon de courbure accessible,
- une diminution de l'épaisseur du circuit. En accord avec les résultats de la simulation, une faible épaisseur permet de diminuer le niveau de contrainte au détriment d'une déformation locale plus importante.

Ces circuits de lecture courbés peuvent être intégrés et caractérisés électriquement selon les techniques standards des composants épais.

C.I.3 - De l'amincissement à la courbure : comportement électrique

Une analyse électrique a été faite après chaque étape du procédé de courbure : l'amincissement puis la mise en forme sphérique.

C.I.3.1 - Préparation des circuits aux tests électriques

C.I.3.1.1 - Circuits amincis

L'analyse du circuit aminci a nécessité une préparation particulière du composant. Dans un montage traditionnel le circuit est rigide (épaisseur de 500 μm), alors que dans le cas présent, le circuit est caractérisé à 50 μm sans être reporté sur une poignée ; il est donc très fragile à manipuler.

Les difficultés technologiques d'intégration sont les mêmes que celles évoquées dans la partie précédente : le collage et le câblage sur la céramique. L'interface de collage doit être changée car elle est trop souple. Lorsque l'outil de câblage filaire vient au contact du circuit, celui-ci s'affaisse sous la pression exercée et se clive. Le choix s'est porté sur une résine qui est fluide à la dépose et qui durcit après polymérisation. Cependant ce dépôt de résine doit être contrôlé afin de ne pas former de bulles en périphérie qui pourraient favoriser de nouveaux clivages sous l'action de l'outil de câblage. Ce collage est pour cette caractérisation, une étape critique. Ainsi, une petite quantité de résine est déposée en périphérie, comme l'illustre la Figure C-11

a. La photo de la Figure C-11 b illustre la finesse du circuit CMOS ainsi que le câblage réalisé.

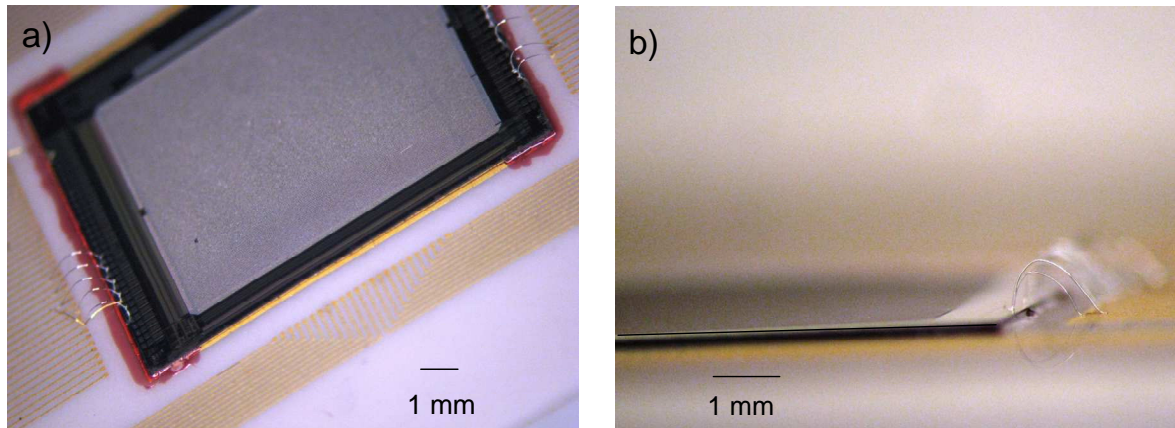


Figure C-11 : CMOS aminci collé par deux bandes de résine rouge (a) et câblé (b) sur la céramique

Une fois câblé, ce composant peut être caractérisé électriquement comme un circuit de lecture standard. Après le test, ce circuit peut être récupéré en éliminant la résine dans l'acétone. Par contre, la préhension de ces circuits est délicate et minutieuse.

C.I.3.1.2 - Circuits courbés

Contrairement au CMOS aminci, une fois que le composant a été courbé sur son verre support, l'ensemble est rigide. Néanmoins, la même difficulté de câblage apparaît au niveau des pliures où la colle est absente. Ces zones sont localisées sur les bords de l'échantillon, c'est-à-dire au niveau des plots d'interconnexion. Au contact de l'outil, la pliure se casse et provoque un clivage dans le composant. La solution consiste à combler ces pliures de résine époxy. La photo Figure C-12 a montre un éclat au niveau des plots au cours du câblage, et la Figure C-12 b présente le circuit câblé sur la céramique.

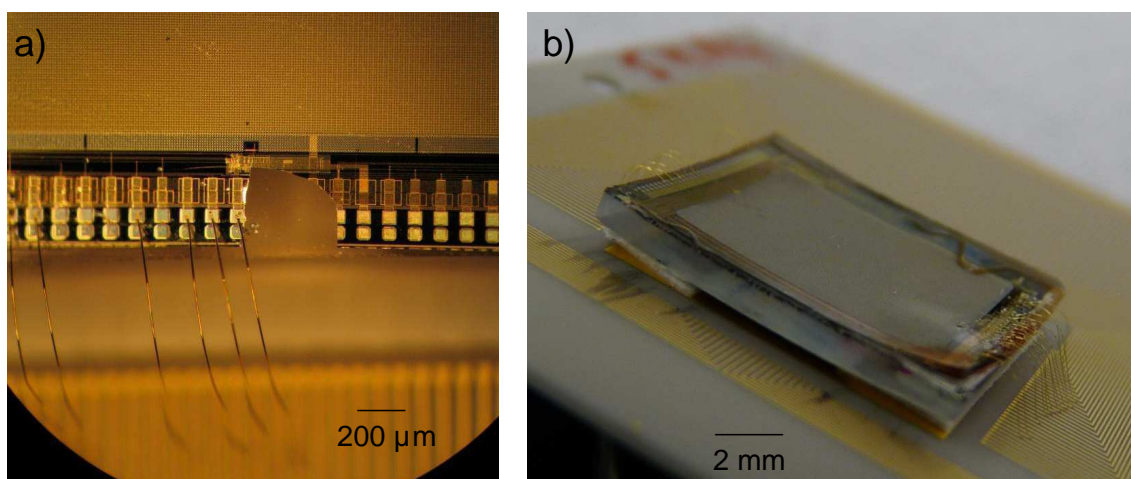


Figure C-12 : a) Eclat sur les plots d'interconnexion ; b) Circuit CMOS câblé sur la céramique

C.I.3.2 - Résultats des tests électriques

En raison des difficultés de câblage, seuls deux Si-CMOS ont pu être testés électriquement : le circuit convexe 1 et concave 2. Le premier n'est cependant pas fonctionnel électriquement. L'information récupérée en sortie de circuit ne permet pas de conclure quant à sa viabilité.

Le deuxième CMOS est courbé en concave avec un rayon de 69,7 mm. Les résultats des caractérisations électriques sont présentés dans les tableaux suivants. Le comportement électrique est testé après amincissement et après courbure, puis comparé avec un circuit de référence.

C.I.3.2.1 - Principe général des tests électriques de détecteurs

Le principe général repose sur l'intégration du courant débitée par la diode (le pixel), dans une capacité. Au repos, la capacité présente une tension de sortie non nulle, notamment fixée par le fonctionnement propre du circuit ; c'est la tension de recharge. Soumis à un flux infrarouge, le détecteur est dit activé, le courant photonique proportionnel à l'énergie incidente est intégré dans la capacité. La grandeur mesurée à ces bornes est appelée tension continue, elle est la somme de la tension de recharge et celle proportionnelle au flux reçu. Ainsi, l'étude électrique porte sur deux grandeurs électriques :

- la tension de recharge : le niveau « zéro » du composant au repos,
- la tension de référence caractérise la tension proportionnelle au flux incident (composant actif), elle est définie par l'Équation C-4.

Les grandeurs mesurées sont la tension et le bruit ; leur forme de réponse étant gaussienne (Figure C-13), on les analyse par leur moyenne et leur dispersion, qui est le rapport de l'écart type avec la moyenne (Équation C-5).

$$V_{référence} = V_{continue} - V_{recharge}$$

Équation C-4 : Tension de référence

$$Dispersion = \frac{\sigma}{M} \cdot 100$$

Avec : σ : écart type et M : moyenne

Équation C-5 : Dispersion

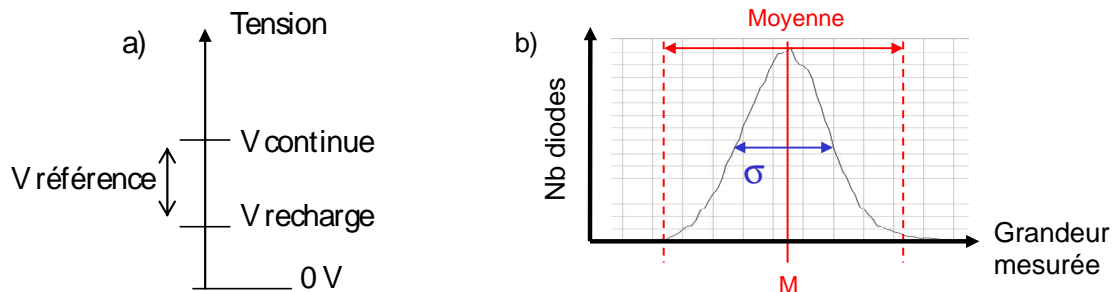


Figure C-13 : Définition des grandeurs électriques caractérisées :

a) tensions V de recharge (composant au repos), tension continue (composant actif) et de référence : tension proportionnelle au flux incident ; b) réponse gaussienne des grandeurs (tension ou dispersion) : moyenne M et écart type σ

Les circuits Si-CMOS ne sont caractérisés que par leur niveau de recharge ; les détecteurs fonctionnels (infrarouge refroidis et bolomètres) sont caractérisés par le niveau de recharge et de référence. Leurs études sont faites par comparaison avec un capteur standard, ces valeurs seront donc présentées sous forme de pourcentage ou différence d'écart.

C.I.3.2.2 - Résultats électriques sur le Si-CMOS

Le circuit CMOS est utilisé dans les deux types de détecteurs : les bolomètres fonctionnant à température ambiante (300 K) et les détecteurs à base de CdHgTe refroidis à 77 K. L'analyse électrique a donc été menée à ces deux températures.

Le Tableau C-2 présente ces résultats. Les mesures du niveau de recharge montrent un faible écart à la température ambiante (5,6 %). Cet écart augmente lorsque la température baisse à 77 K (différence de 170 mV soit 11 %). Les caractérisations ont montré que la réponse du composant dérive avec le temps. Juste après la mise en froid, on mesure une tension proche de celle observée sur le composant standard ; après un certain temps, l'écart atteint 18 %. Ce phénomène s'explique par le support en verre nécessaire à la mise en forme sphérique. La régulation en température s'avère plus délicate, du fait de la faible conduction thermique du verre (1,1 W/m/K (ISP OPTICS 2011)) en comparaison du silicium (156 W/m/K) (Glassbrenner & Slack 1964) ou de la céramique de routage (20 W/m/K) (Microcertec S.A.S. 2011).

Néanmoins, les bruits du circuit mesurés aux deux températures restent acceptables. Même si le bruit augmente à la température de 77 K, l'écart mesuré est inférieur à 6 %. Cette valeur est dans l'erreur de la mesure de bruit. Cette analyse est sensible aux instruments et à l'environnement variant d'une campagne de mesures à une autre, et donc notamment elle diffère entre les mesures sur le composant de référence et ceux de mon étude.

Niveau de recharge	Température = 300 K		Température = 77 K	
	Tension	Bruit	Tension	Bruit
Ecart des valeurs moyennes (%)	5,6	- 2,6	11,3	- 5,8
Ecart en dispersion (%)	- 0,2	1,3	- 0,2	0,5

Tableau C-2 : Comparaison du comportement électrique du CMOS courbé et épais

La même caractérisation a été faite pour déterminer la dégradation apportée par l'étape d'amincissement (Tableau C-3). Les mesures ont été menées uniquement à 300 K, afin de ne pas solliciter le circuit par des écarts importants en température.

Niveau de recharge	Tension	Bruit
Ecart des valeurs moyennes (%)	- 0,4	- 4,8
Ecart en dispersion (%)	- 0,023	0,003

Tableau C-3 : Comparaison du comportement électrique du CMOS courbé et aminci à 300K

Les écarts mesurés sont faibles : la tension est inférieure à 1 % et le bruit est inférieur à 5 % ; ces deux valeurs sont respectivement dans la variabilité technologique entre composants et dans l'erreur de mesure de bruit. De plus, les valeurs des écarts en dispersion sont négligeables. Ainsi, ces résultats montrent que les comportements des circuits courbé et aminci sont similaires, et correspondent au fonctionnement du circuit de référence.

Ainsi, l'étape d'amincissement et de courbure ne dégradent pas le comportement électrique du circuit de lecture CMOS. La comparaison entre l'état aminci et courbé a été faite uniquement à la température de 300 K, il n'est pas possible de confirmer l'influence du support sur la dérive électrique ; néanmoins, la concordance de mes résultats de caractérisation avec les standards permettent de garantir le bon fonctionnement électrique du circuit Si-CMOS après amincissement et après courbure.

Donc, le procédé de courbure dans sa globalité ne dégrade ni mécaniquement ni électriquement le circuit Si-CMOS.

Courbure du Si-CMOS

Cette partie a prouvé la possibilité de courber un circuit de lecture de type Si-CMOS. Le procédé de courbure est transférable aux circuits fonctionnels. Les deux adaptations nécessaires consistent à protéger la surface active de ces circuits par un film, et à ajuster le support aux dimensions de ces composants. Ainsi, ils peuvent être intégrés selon le procédé des composants standards. Le report sur céramique et le câblage ne sont pas modifiés malgré la courbure et l'épaisseur supplémentaire apportée par le support. Cependant, l'état de surface du circuit doit être soigné, notamment les bords du circuit après découpe et amincissement, afin de limiter les risques de clivage.

Les tests électriques, menés sur le CMOS aminci puis courbé en concave, ont montré un fonctionnement comparable aux circuits CMOS standards. Bien que la technique d'amincissement ne soit pas comparable à celle utilisée pour les échantillons de silicium, le fonctionnement électrique du circuit n'est pas dégradé. Ce résultat constitue l'étape de validation clé pour la suite des travaux dans le cadre de ma thèse. Néanmoins, à plus long terme, l'amincissement doit être collectif pour profiter du déstressage.

L'objectif de la thèse est la courbure de détecteurs infrarouge. Les détecteurs quantiques à base de CdHgTe, seront utilisés pour adresser les applications de biomimétisme des yeux d'insectes, où la courbure recherchée est convexe. Leur circuit de détection pouvant être modifié en interne au département, la partie suivante détaillera l'architecture en groupe de pixels de type œil d'insecte qui a été réalisé. La courbure du détecteur bolométrique fait l'objet de la troisième partie.

C.II - Les détecteurs photovoltaïques

Les détecteurs infrarouge refroidis sont basés sur un principe photovoltaïque. Ces imageurs sont composés de deux sous-éléments :

- un circuit de détection composé d'une matrice de pixels sensibles au rayonnement,
- un circuit de lecture Si-CMOS.

Cette architecture a conditionné la stratégie de courbure. En effet, la mise en forme sphérique de ce détecteur nécessite la courbure concentrique des deux circuits. Le composant Si-CMOS a été étudié dans la partie précédente ; son potentiel de courbure a été mis en évidence et les conclusions de cette étude ont permis de lever un premier verrou technologique. Le deuxième verrou est la courbure du circuit de détection qui fait l'objet de cette partie.

Le premier chapitre a présenté les différentes applications des détecteurs courbes : la miniaturisation en copiant la structure des yeux d'insecte et la correction d'aberration de courbure de champ. Le biomimétisme de la vision multi-pupillaire des insectes est une application prometteuse dont la courbure est convexe à faible rayon. Son architecture optique, en rupture avec la conception traditionnelle, est composée d'une matrice de lentilles adressant des groupes de pixels distincts, ce qui permet de miniaturiser le système et d'accéder à de larges champs. Le premier chapitre a décrit ces avantages et le deuxième a présenté le gain mécanique apporté par cette structure en îles de matériau pour la mise en forme sphérique. L'architecture des imageurs infrarouge refroidis profite de cette solution de mise en forme sphérique. En effet, le matériau sensible étant fragile, le circuit de détection doit être découpé en îles de matériaux pour obtenir de faibles rayons de courbure.

Cette nouvelle architecture est particulièrement novatrice et elle a représenté un gros travail de conception. Cette partie sera divisée en trois sections. Dans un premier temps, la structure du détecteur infrarouge refroidi sera détaillée afin d'appréhender la difficulté technologique de réalisation des imageurs en CdHgTe (Cadmium Mercure Tellure). La deuxième partie sera consacrée aux nouvelles matrices structurées en groupes de pixels. Enfin, la dernière présentera les résultats électriques de ces nouveaux circuits.

C.II.1 - Technologie des détecteurs photovoltaïques infrarouge

La détection du rayonnement infrarouge des imageurs considérés ici, repose sur un principe photovoltaïque. Ce principe est détaillé dans cette section, afin d'appréhender par la suite l'empilement technologique de ce composant.

C.II.1.1 - Le fonctionnement des détecteurs infrarouge refroidis

Le circuit de détection des imageurs infrarouge refroidis est une matrice de diodes semi-conductrices (jonctions p/n) implantées dans le matériau CdHgTe. Technologiquement (Mathieu & Fanet 2009), une diode est la jonction de deux matériaux semi-conducteurs respectivement dopés p (dopage majoritaire en trous) et n (majoritaire en électrons). La diffusion des porteurs d'une zone à l'autre crée un champ électrique E formant une zone dite de charge espace W caractérisée par une barrière de potentiel. D'un point de vue énergétique,

le matériau semi-conducteur est décrit par deux bandes d'énergie : une bande de valence et une de conduction, séparées d'une bande interdite (E_g) (Figure C-14).

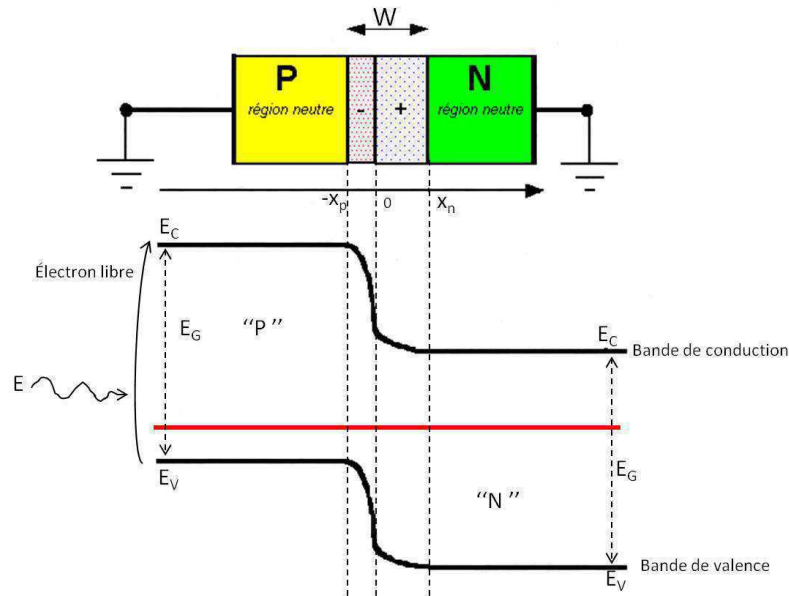


Figure C-14 : Jonction p/n : schéma technologique et diagramme des niveaux d'énergie

L'absorption d'un photon d'énergie supérieure à cette bande interdite permet de créer des paires électrons-trous, augmentant ainsi le nombre de porteurs libres dans la bande de conduction qui diffusent vers la zone de charge espace. Sous l'effet de la barrière de potentiel, ces électrons libres créent un courant de conduction. Le courant dans la diode est donc proportionnel au flux incident. Ce courant photovoltaïque est collecté et amplifié par le circuit de lecture.

L'interconnexion des deux circuits est réalisée par une hybridation obtenue par flip-chip. Cette technique englobe toutes les technologies de report pour lesquelles la puce, qui possède tous ses contacts sur une seule face, est retournée pour être assemblée au substrat d'accueil. Au sein du laboratoire, l'hybridation est effectuée par un brasage, au moyen d'une matrice de billes d'indium, de la matrice sensible sur le circuit de lecture Si-CMOS (Figure C-15).

Ainsi, chaque pixel de la matrice sensible est connecté via une bille d'indium à une entrée du circuit de lecture. Après un traitement du signal approprié, la cartographie des intensités permet de former l'image de la scène observée.

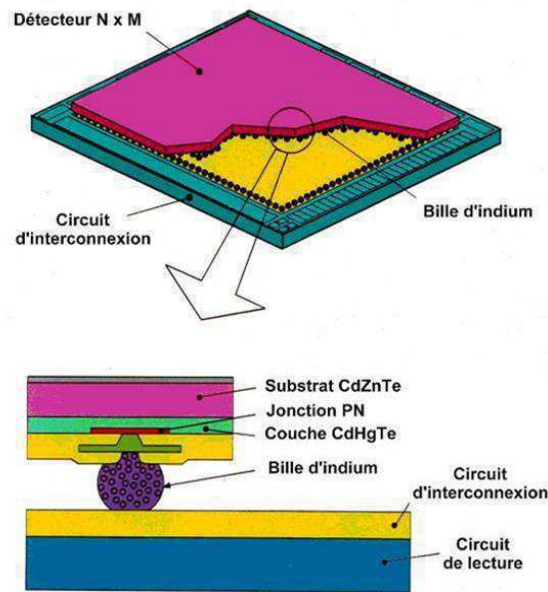


Figure C-15 : Schéma de l'interconnexion de deux circuits

C.II.1.2 - Technologie des détecteurs infrarouge refroidis

Le circuit de lecture est le Si-CMOS étudié dans la partie précédente. Nous allons dans cette partie nous focaliser sur le circuit de détection.

Le circuit de détection est fabriqué à partir d'un semi-conducteur ternaire CdHgTe d'une dizaine de microns, sur lequel une couche de passivation (CdTe/ZnS) est déposée. Ce matériau croît sur un substrat de croissance constitué de CdZnTe (Cadmium Zinc Tellure).

A la croissance, la couche de CdHgTe utilisée pour ces travaux est dopée p ; elle forme donc la masse commune des diodes. Les zones dopées n sont ponctuelles sur la surface et répétées périodiquement. Ce pas forme le pas pixel qui décrit la matrice. Dans cette thèse, le pas des imageurs est de $30\ \mu\text{m}$ et le nombre de pixels est un standard TV/4, à savoir 320×256 pixels. Les diodes se forment par le contact entre le substrat dopé p et cette zone dopée n ; elles sont polarisées en inverse.

Le schéma de la Figure C-16 illustre deux jonctions p/n créées dans le substrat CdHgTe et le schéma électrique de ces diodes.

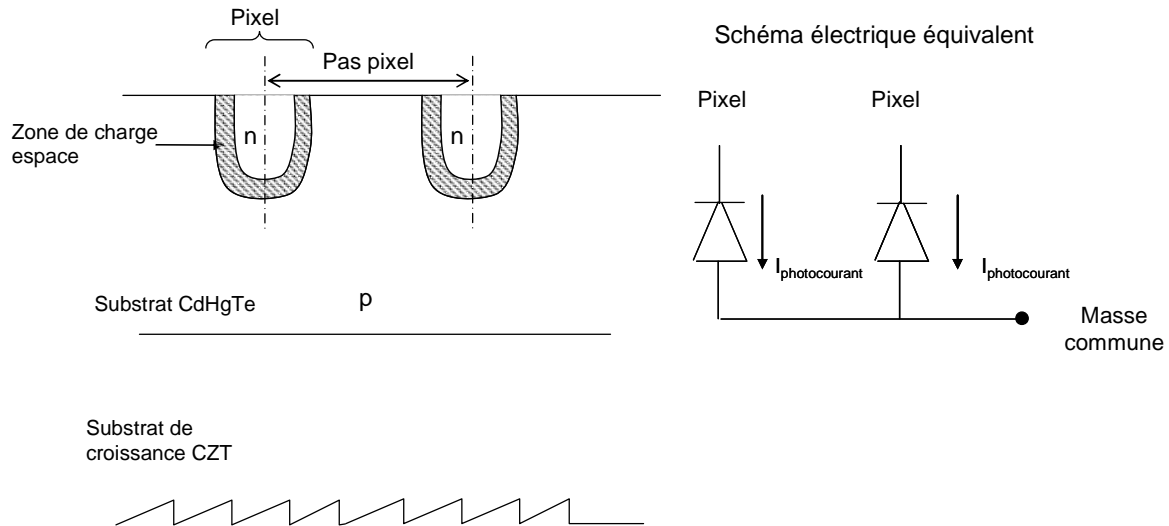
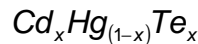


Figure C-16 : Schéma technologique de deux diodes et schéma électrique équivalent

Dans le cas d'un semi-conducteur tel que le silicium, le dopage est obtenu par l'insertion dans la maille cristalline d'atomes, dont la structure atomique est riche en électrons libres (dopage n) ou déficitaire (dopage p). Par exemple, le dopage n du silicium est obtenu par l'insertion de phosphore possédant un électron libre supplémentaire.

Contrairement au silicium, le dopage du CdHgTe est obtenu par un écart à sa stœchiométrie (Équation C-6), c'est-à-dire par la formation de lacunes de mercure dans le matériau (G. L. Destefanis 1991).



Équation C-6 : Stœchiométrie du CdHgTe

Ces lacunes de mercure sont créées par un apport énergétique extérieur ; technologiquement, les zones n sont créées par une implantation ionique. Néanmoins, la facilité du mercure à migrer dans la structure fait qu'une forte température ou une gravure non contrôlée peut créer de nombreuses lacunes dans la maille cristalline ; ainsi le dopage du matériau peut être considérablement modifié. Cet écart au dopage intrinsèque modifie également la longueur d'onde de coupure du matériau et donc la bande de détection.

Le graphe Figure C-17 présente la dépendance de la largeur de la bande interdite avec la concentration de mercure (Hansen et al. 1982). Cette particularité permet à ce matériau d'adresser les trois bandes spectrales infrarouge, cependant, l'inconvénient est sa grande sensibilité aux contraintes mécaniques et à la température.

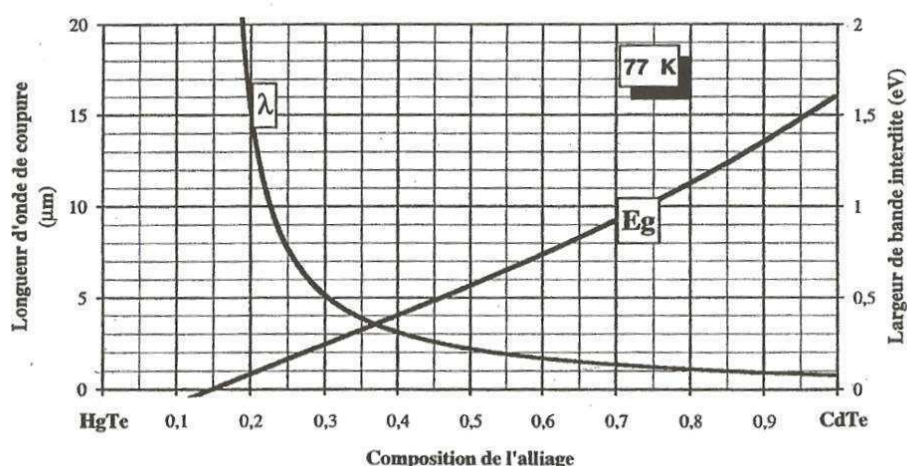


Figure C-17 : Energie de bande interdite du CdHgTe en fonction de la concentration de mercure

Pour adresser la diode, deux contacts doivent être créés : le contact diode (CTD) qui est relié à la diode unitaire et plus exactement à la zone dopée n , et le contact substrat (CTS) qui est donc relié à la zone dopée p . Technologiquement, ces deux contacts sont pris par une gravure profonde dans le matériau suivie d'une métallisation. La gravure du CTS est réalisée sur la périphérie de la matrice de diodes, ce qui permet d'uniformiser le contact p le long de la matrice. Le contact CTD est pris pour chaque diode.

Ces points de contacts sont reliés au circuit de lecture grâce à l'étape d'hybridation sur le circuit Si-CMOS. Des billes d'indium sont déposées au pas du pixel sur une surface correspondant à la dimension du circuit de détection. En vis-à-vis des billes du circuit de lecture se trouvent, soit les métallisations des diodes, soit des plots d'or autour des 320×256 pixels (zone mécanique de longueur approximative $500 \mu\text{m}$). Grâce à l'affinité chimique des billes d'indium avec l'or, il se forme une interconnexion mécanique et électrique et les deux circuits sont dits hybridés. Le contact diode permet le transfert du flux incident reçu par chaque pixel.

Le contact CTS est, quant à lui, connecté au circuit de lecture par une seule série de billes située sur une seule longueur de la périphérie du détecteur. La Figure C-18 illustre les contacts CTD et CTS ainsi que l'hybridation avec le circuit Si-CMOS.

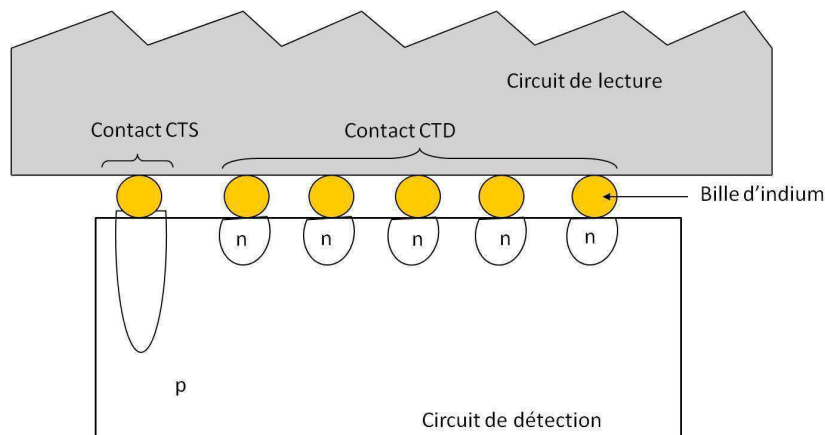


Figure C-18 : Schéma matrice avec billes

Procédé standard

En résumé, les points importants du procédé standard sont les suivants :

- les diodes sont des jonctions p/n entre le substrat CdHgTe dopé p et la zone n qui est une modification locale du matériau obtenue par la formation de lacunes de mercure,
- le contact substrat (zone p) est un cadre gravé sur toute la périphérie de la matrice,
- les diodes sont placées à distance de cette gravure afin de ne pas subir les éventuels écarts à la stœchiométrie du CdHgTe induits par la gravure,
- les diodes sont chacune connectée à une bille d'indium, formant le CTD.

La principale difficulté de fabrication de la matrice de détection à base de CdHgTe est la sensibilité du matériau à toute contrainte extérieure. Or, la mise en forme sphérique nécessite l'application d'une contrainte ; bien qu'elle soit faible, nous avons choisi de modifier la structure de la matrice de détection, en formant des groupes de pixels interconnectés selon la deuxième technique décrite au chapitre B.

C.II.2 - Circuit de détection de type œil d'insecte

C.II.2.1 - Stratégie de courbure

Nous avons fait le choix d'adresser, avec ces imageurs, les applications à forte courbure inspirées de la vision multi-pupillaire des insectes. Cette stratégie sera détaillée dans un premier temps, afin de mettre en évidence les verrous technologiques de cette solution, puis la deuxième partie entrera dans les détails de cette matrice modifiée de type « œil d'insecte ».

C.II.2.1.1 - Savoir faire : projet AMIS

La structuration du circuit de détection en CdHgTe, a déjà fait l'objet de travaux au sein du laboratoire. L'objectif du projet AMIS (AMinci ISolé) (Lasfargues & Marion 2007) consistait

à individualiser les pixels de la matrice par des gravures profondes, sur toute l'épaisseur de la couche de CdHgTe, pour accommoder l'écart en dilatation de la structure de l'imageur refroidi. Ces tranchées métallisées par la suite, permettent la connexion mécanique et électrique des pixels. Le substrat est aminci par polissage, puis par un traitement chimique, afin de ne conserver que la couche sensible de CdHgTe et les ponts métallisés. Ainsi, en fin de procédé, le circuit de détection est formé de pixels unitaires reliés par des ponts d'or totalement flexibles. Le schéma de la Figure C-19 illustre ce procédé (Marion & Gravrand 2008).

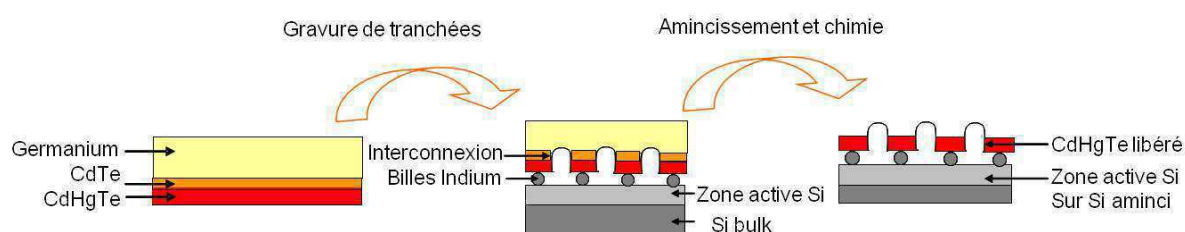


Figure C-19 : Le procédé AMIS : structuration du circuit par pixels unitaires

Ce projet a permis de développer un savoir faire dans l'amincissement du circuit de détection, sans dégrader la couche sensible ni l'hybridation sur le circuit de lecture.

Cette structure faite à l'échelle du pixel constitue un premier aperçu du comportement du CdHgTe. L'architecture constituée de tranchées métallisées est conservée, mais la structure géométrique est modifiée pour copier la vision multi-pupillaire des insectes, et en particulier celle du *Xenos Peckii*. Ce parasite de la guêpe (Buschbeck et al. 2003) possède un système visuel composé de groupes de pixels plus important que les insectes tel que la mouche ; cette structure lui confère une meilleure résolution.

L'objet de cette partie est de copier cette structure afin, par la suite, de la courber et répondre ainsi aux applications biomimétiques dont cet insecte fait l'objet (Druart et al. 2009).

C.II.2.1.2 - Objectifs de fabrication

Le premier chapitre a présenté cette structure multivoie dont chaque facette est composée de plusieurs pixels. Le circuit de détection possèdera les caractéristiques suivantes :

- la matrice sensible est distinguée en sous-groupes carrés de 64x64 pixels, garantissant un remplissage homogène,
- l'interconnexion est obtenue par une tranchée profonde et métallisée selon le procédé d'amincissement développé dans le projet AMIS.

Etant donné que le circuit Si-CMOS n'est pas modifié, la nouvelle matrice doit prendre en compte les contraintes d'hybridation. Ainsi, ce nouveau circuit de détection doit être compatible avec les circuits de lecture standards, ce qui implique :

- la conservation du mode de reprise des contacts diode et substrat,
- la compatibilité avec le circuit CMOS billé sur toute la surface sensible.

C.II.2.2 - Matrice modifiée de type « œil d'insecte »

Les véhicules de test sont les détecteurs infrarouge dans la gamme MWIR (3 μm – 5 μm), au format TV/4, soit 320x256 pixels avec un pas de 30 μm .

C.II.2.2.1 - Réalisation des diodes : CTD

Les diodes sont fabriquées par usinage ionique. Cette seule étape de gravure est suffisante pour créer une jonction p/n électriquement viable sans rajouter une étape d'implantation. L'étape de métallisation de ces diodes est identique au procédé standard ; les plots d'or ainsi formés, assureront l'hybridation de ces mini-matrices de manière identique au procédé standard.

C.II.2.2.2 - Réalisation des tranchées

L'espace de 480 μm entre les mini-matrices est dédié à la fabrication des interconnexions. Elles sont technologiquement obtenues par une gravure profonde qui dépasse la couche CdHgTe, puis par une métallisation composée majoritairement d'or. Après amincissement complet du substrat, ces tranchées forment des « membranes » souples d'or qui assureront deux fonctions :

- la continuité électrique entre les mini-matrices,
- la déformation nécessaire à la mise en forme sphérique.

Les travaux publiés sur la mise en forme sphérique d'un composant en groupes de pixels, montrent que les interconnexions se déforment grâce à une ondulation (Ko et al. 2009). Selon ces observations, nous avons choisi de préformer les interconnexions en ondulations souhaitant ainsi faciliter leur déformation. Quatre variantes ont donc été envisagées. Elles se distinguent selon la largeur des interconnexions formées, donc selon la largeur de la gravure :

- 480 μm : une tranchée,
- 240 μm : deux tranchées,
- 110 μm : quatre tranchées,
- 60 μm : huit tranchées.

La Figure C-21 présente ces quatre variantes vues de dessus (figure a) et en coupe (figure b) schématisant les ponts formés après amincissement du substrat.

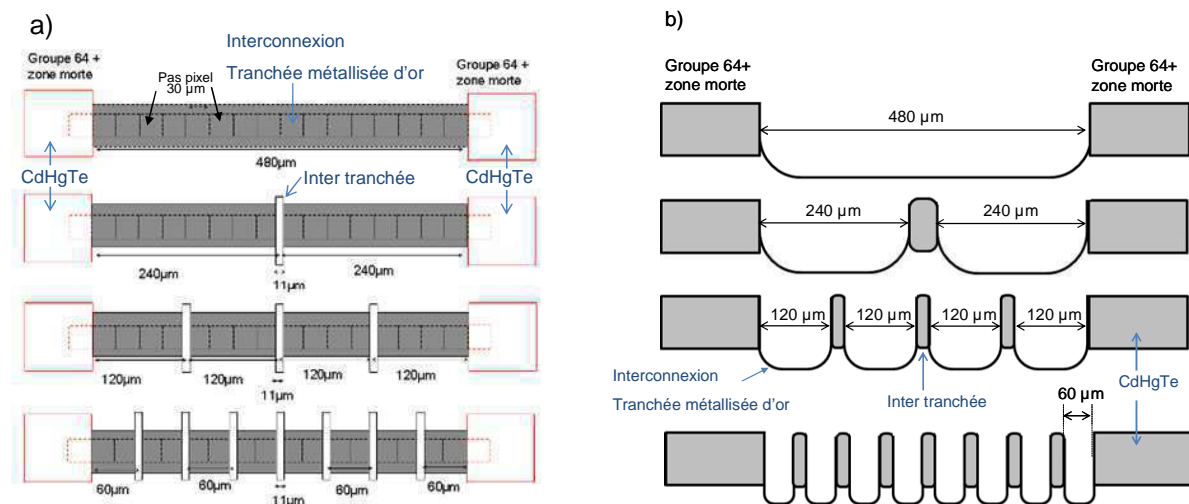


Figure C-21 : Formation des interconnexions – 4 variantes selon la longueur de tranchées en vues de dessus (a) et en coupe (b)

L'espace inter-tranchée est de $11\ \mu\text{m}$ sur le masque de photolithographie et tombe à $10\ \mu\text{m}$ sur les matrices fabriquées. En effet, la gravure en profondeur s'accompagne en faible proportion d'une sur-gravure latérale. Compte tenu de l'épaisseur de la couche à graver, la partie supérieure des flancs est usinée, formant un profil évasé. L'espace inter-tranchée est ainsi diminué par rapport à la côte initialement prévu.

Cette largeur d'inter-tranchée permet de s'affranchir du problème d'hybridation, illustré à la Figure C-22. En effet, le circuit Si-CMOS n'étant pas modifié, les tranchées qui seront à terme métallisées, font face à des billes d'indium. Afin d'empêcher un contact électrique, l'espace inter-tranchée doit être inférieur à la distance entre les billes. Comme nous le verrons par la suite, ces interconnexions assurent la continuité du contact substrat ; il est donc primordial que la distinction soit nette pour éviter tout court circuit.

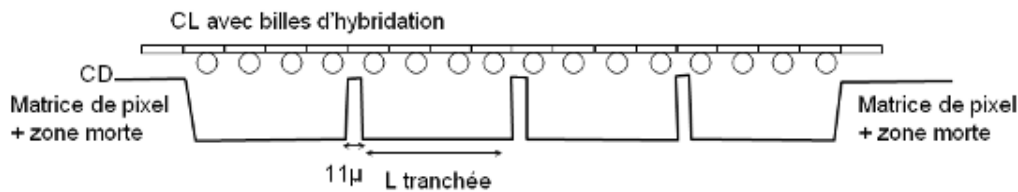
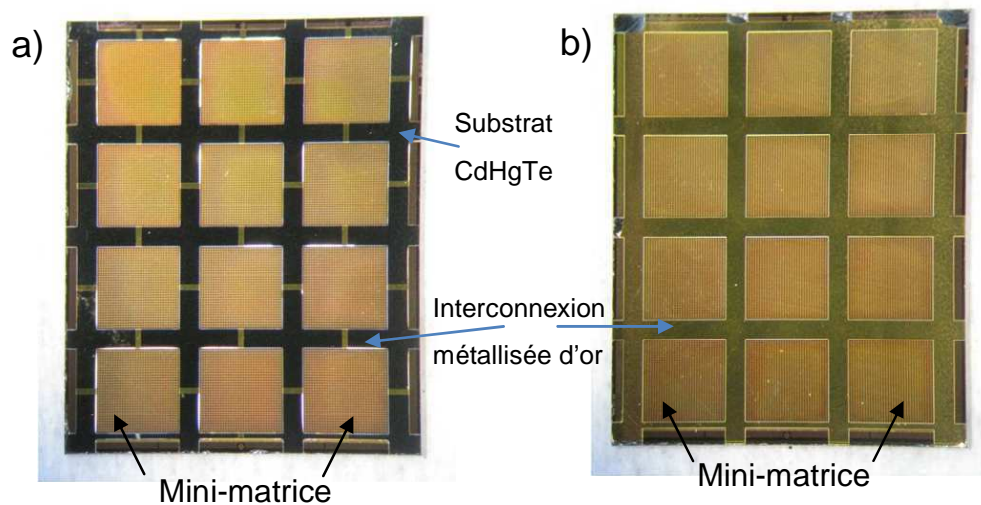


Figure C-22 : Positionnement des tranchées face aux billes d'hybridation

C.II.2.2.3 - Métallisation

Trois variantes de métallisation des tranchées ont été effectuées et sont illustrées à la Figure C-23 :

- continue : métallisation sur toute la tranchée et les sommets,
- dentelle : métallisation sur une largeur inférieure à celle des mini-matrices,
- oscillante : métallisation dans la tranchée et sur une fine bande au niveau des sommets.



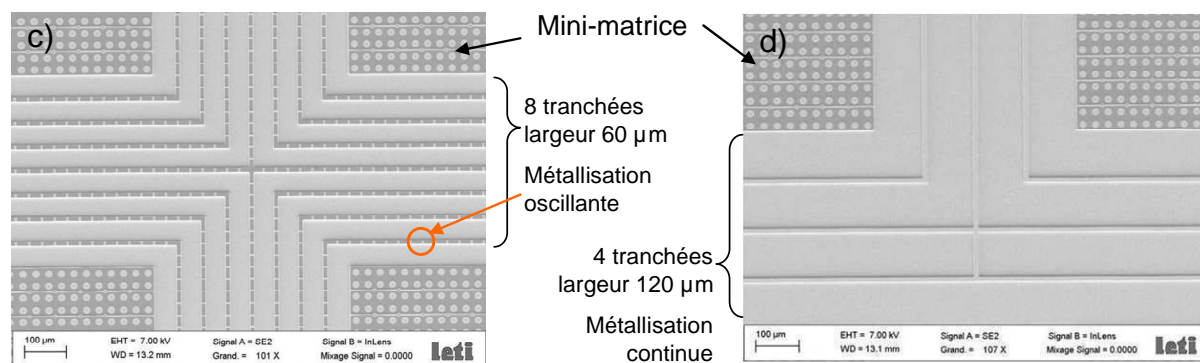


Figure C-23 : Variantes de métallisation des tranchées

Photos : a) métallisation dentelle ; b) métallisation continue (1 tranchée) ;

Clichés de microscopie électronique à balayage :

c) métallisation oscillantes (8 tranchées) comparées à d) métallisation continue (4 oscillations)

Nous allons étudier plus particulièrement la métallisation oscillante qui sera la variante retenue pour l'étude électrique. En effet, elle permet de limiter les risques de contact entre la métallisation des interconnexions et les billes d'indium. Pour cela, la métallisation des inter-tranchées est faite sur une largeur de 6 μm , positionnée entre quatre billes adjacentes. Le schéma Figure C-24 illustre cette structure et la compare à une métallisation complète de l'espace inter-tranchée.

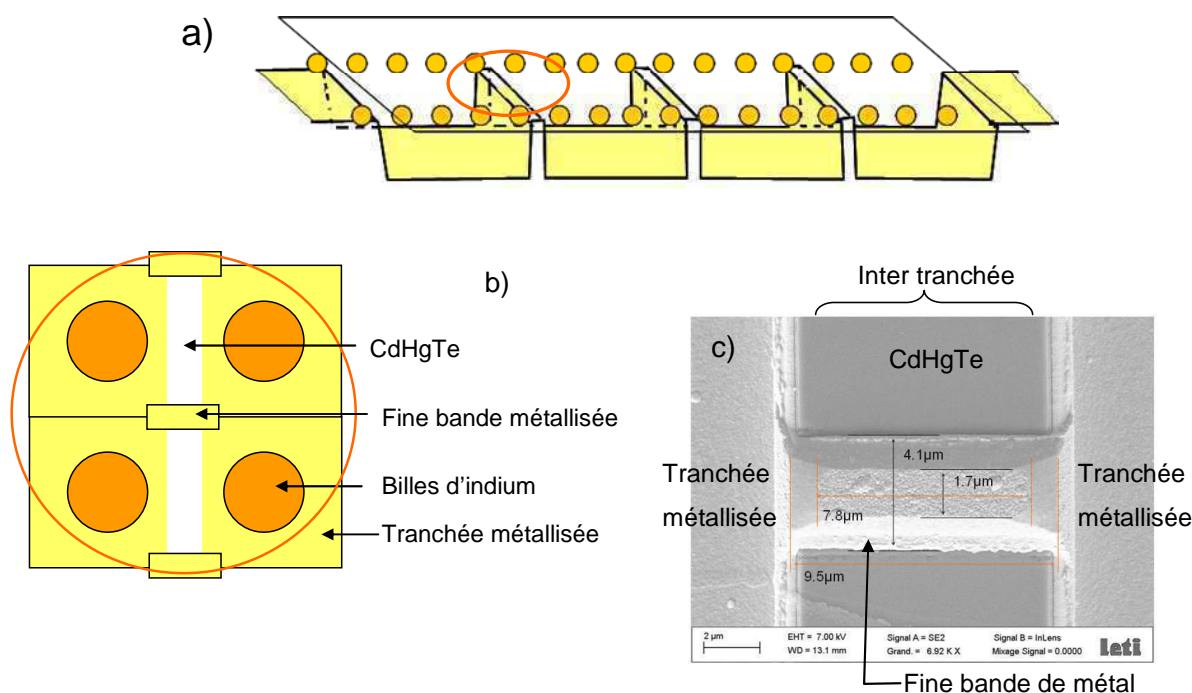


Figure C-24 : Métallisation des tranchées oscillantes

a) schéma 3D des tranchées ; b) agrandissement au niveau des inter-tranchées ; c) photo au microscope électronique à balayage d'une fine bande sur une inter-tranchée

Le dépôt de métal est naturellement favorable à mes objectifs de fabrication. En effet, la bande obtenue est de type pyramidal avec des flancs très inclinés ; par conséquent, la

distance entre les quatre billes adjacentes et le sommet de la bande métallisée est augmentée et le risque de contact diminué.

C.II.2.2.4 - Organisation des tranchées sur la matrice

La Figure C-25 illustre le croisement des tranchées verticales et horizontales entre quatre groupes adjacents.

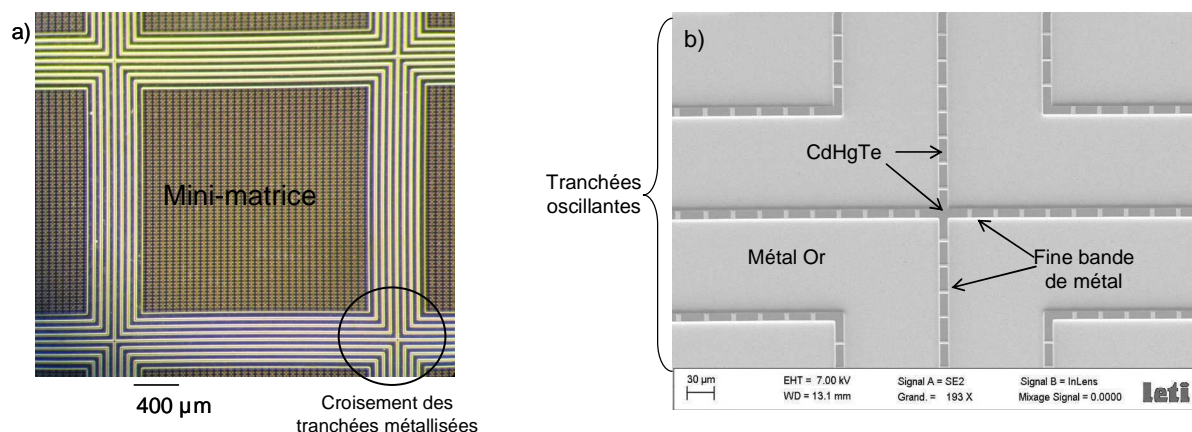


Figure C-25 : Croisement des tranchées entre les mini-matrices

Elles sont également prolongées jusqu'au chemin de découpe afin de rendre flexible tout le composant, y compris les zones mécaniques situées en bord de circuit. Pour cela, une tranchée en diagonale a été gravée, partant de l'angle de la mini-matrice vers le coin de la matrice TV/4, dans laquelle se terminent les tranchées périphériques horizontales et verticales (Figure C-26).

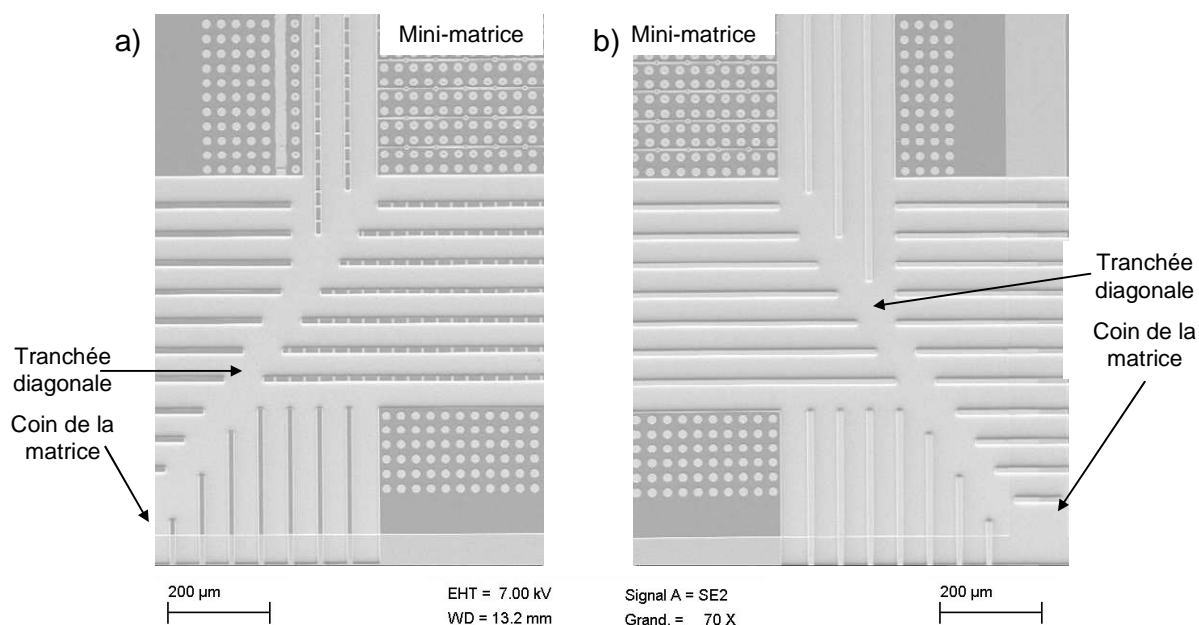


Figure C-26 : Architectures dans les coins des matrices (microscope électronique à balayage)
a) matrice métallisation oscillante largeur 60 µm ; b) matrice métallisation continue largeur 60 µm

C.II.2.2.5 - Réalisation technologique

Ces tranchées ont nécessité une étude amont, afin de garantir une morphologie de gravure et de métallisation facilitant la mise en forme sphérique. Pour cela, les objectifs sont :

- une gravure profonde afin de dépasser la couche de CdHgTe,
- un profil arrondi en sortie de cette couche afin que la membrane en or ne présente aucun angle vif qui serait propice à une rupture mécanique.

Cette morphologie est obtenue par l'orientation du faisceau d'ions lors de l'usinage. Deux angles successifs permettent d'obtenir un profil de gravure vertical avec un point d'inflexion dans le CdHgTe puis un arrondi dans le CdZnTe (Figure C-27).

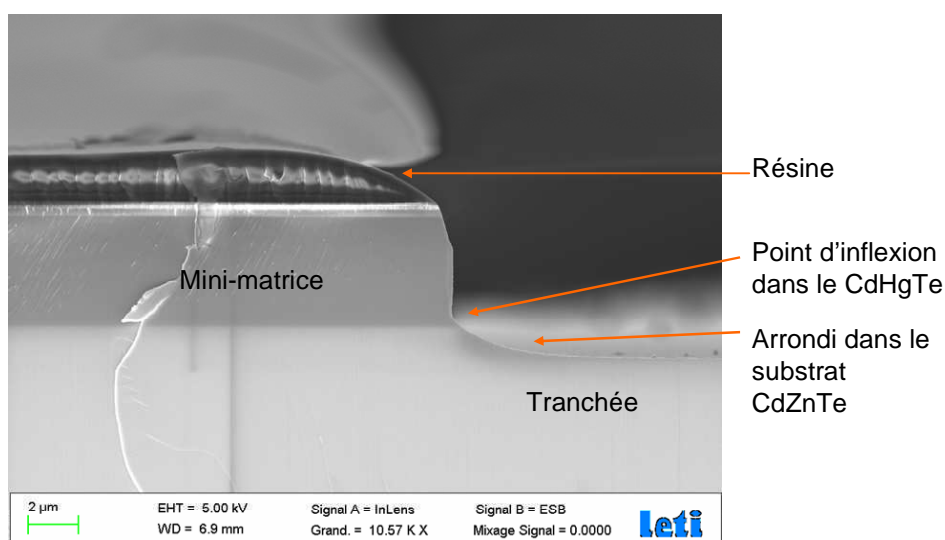


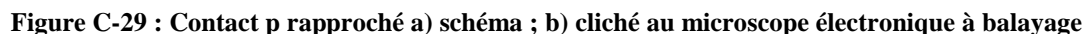
Figure C-27 : Profil de gravure des tranchées (photo au microscope électronique à balayage)

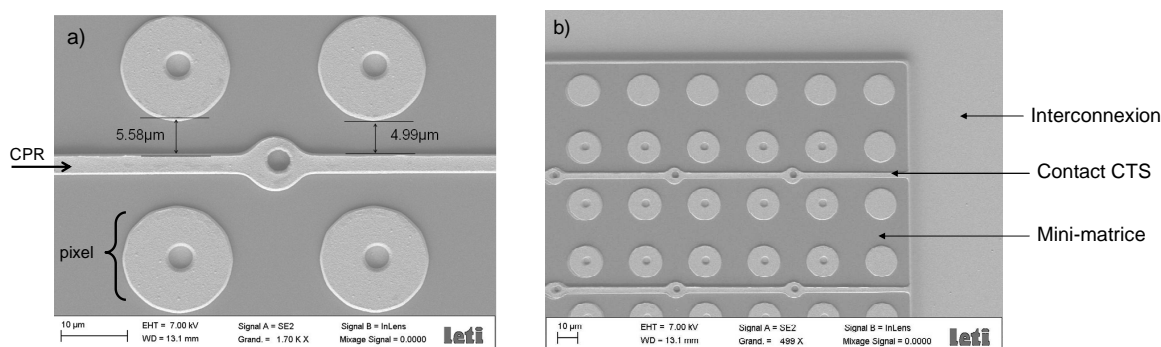
C.II.2.2.6 - Réalisation du contact substrat (CTS)

Le cadre CTS du circuit standard ne peut être conservé compte tenu de sa rigidité. Nous avons choisi de prolonger les tranchées sur toute la périphérie du circuit, par conséquent, le report du contact substrat doit être modifié. Deux solutions sont envisagées : la première consiste à rapporter un cadre CTS sur la mini-matrice, la deuxième consiste à réaliser un CTS ponctuel entre les pixels (contact *p* rapprochée : CPR) ; ces deux contacts sont ensuite rapportés sur un côté du Si-CMOS comme dans les matrices standards.

C.II.2.2.6.1 - Solutions envisagées

La première solution considère le groupe de pixels comme une petite matrice à part entière (Figure C-28) ; ainsi le cadre CTS standard est gravé sur tout le contour de la mini-matrice dans la zone morte. Il a une largeur telle que la bille d'indium du CMOS en vis-à-vis ne touche pas les flancs de sa métallisation.





**Figure C-30 : Le contact p rapproché (microscope électronique à balayage) :
a) agrandissement du contact entre 4 pixels ; b) une mini-matrice**

C.II.2.2.7 - Connexion du CTS avec le circuit de lecture

La connexion du contact substrat (CTS) au circuit de lecture est réalisée sur un bord de la matrice. Etant donné que les tranchées sont prolongées jusqu'au chemin de découpe, la connexion ne peut être établie que sur la longueur de la mini matrice. La Figure C-31 montre cette structure : la mini-matrice est représentée en bleu, les tranchées en gris et la connexion en orange. Les plots d'or connectés aux billes d'indium du CMOS constituent le contact p pixellisé. La ligne jaune est un contact CTS équivalent à celui réalisé sur les mini-matrices.

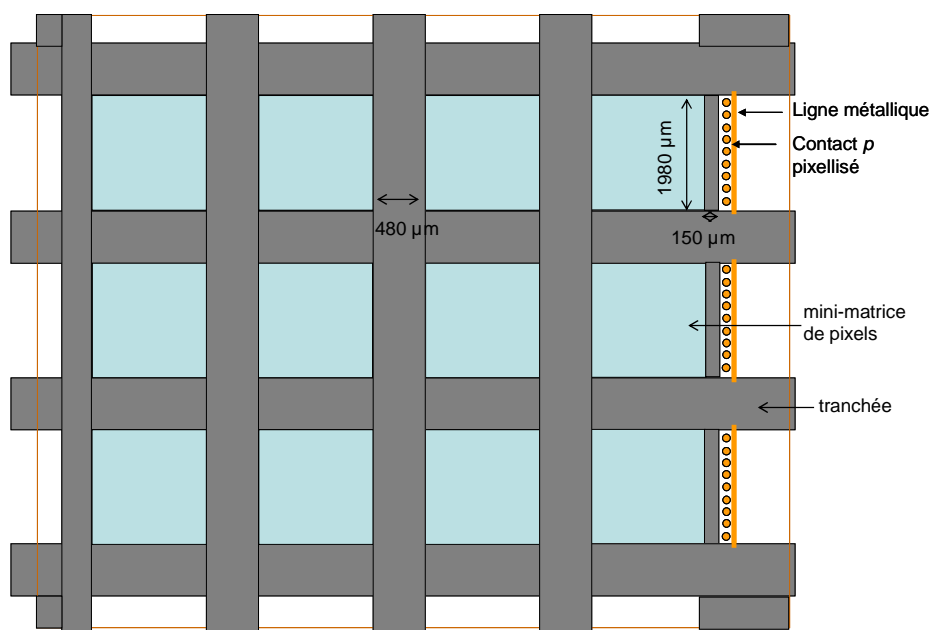
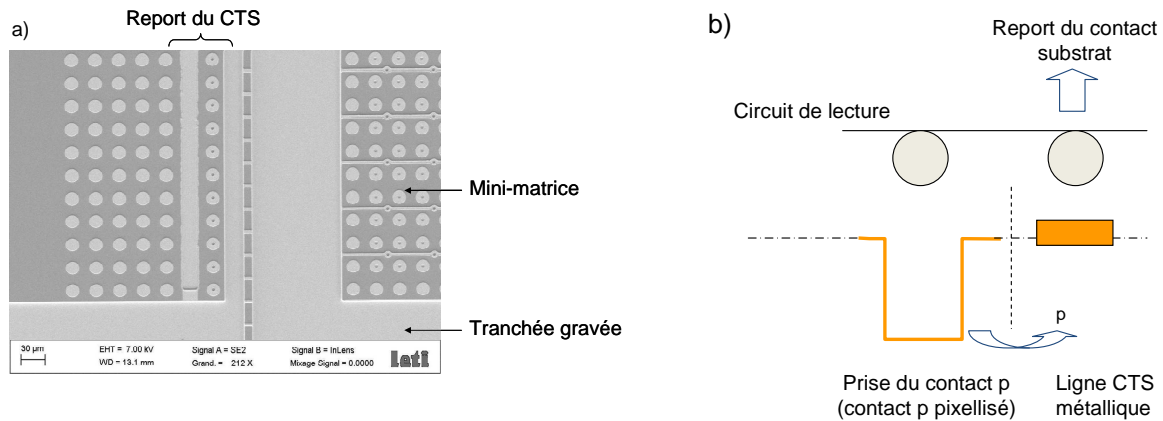


Figure C-31 : Connexion du contact substrat (CTS) au circuit de lecture en bord de matrice

Ces contacts CTS de bord de matrice sont reliés à ceux des mini-matrices par les tranchées. Ainsi, les métallisations de la ligne CTS et des tranchées sont superposées. La Figure C-32 montre le report du contact substrat et schématise son fonctionnement.



**Figure C-32 : Contact CTS a) photo au microscope électronique à balayage ;
b) schéma du fonctionnement**

Matrice modifiée de type « œil d'insecte »

Cette matrice infrarouge refroidie modifiée a nécessité une transformation complète de la structure classique. Les éléments de cette matrice sont :

- la structure en mini-matrice de 64x64 pixels,
- des interconnexions métallisées assurant la continuité électrique et la souplesse mécanique,
- le report du contact substrat sur les mini-matrices.

Cette structure a été réalisée avec douze variantes dont les points technologiques principaux sont :

- la réalisation de tranchées métallisées préformées en 1, 2, 4 ou 8 ondulations,
- la métallisation de ces interconnexions (3 variantes),
- le type de contact substrat réalisé (2 variantes).

La photo de la Figure C-33 montre une plaque fabriquée avec ces douze variantes.

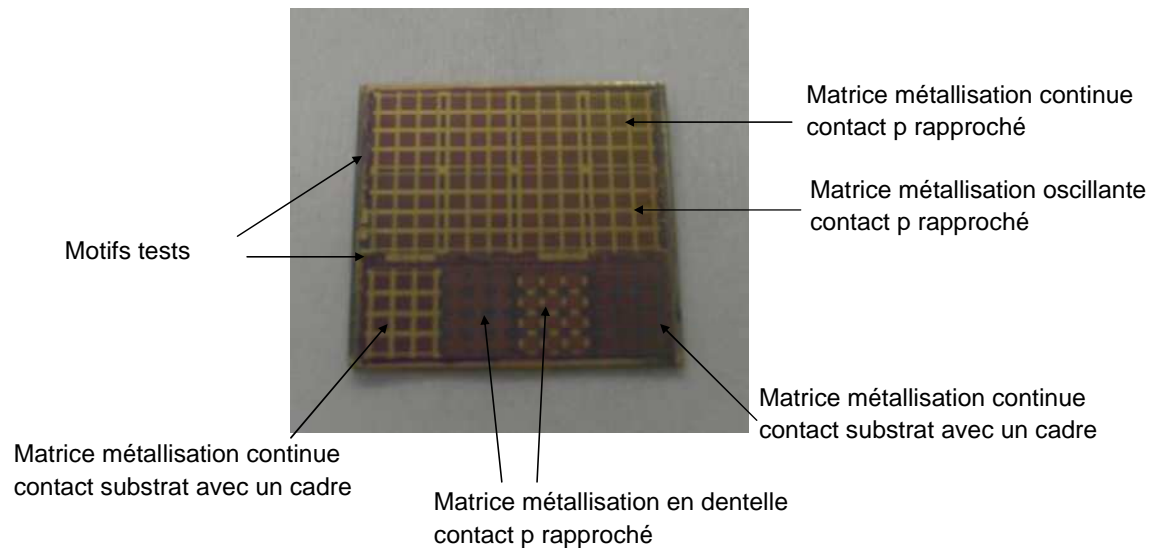


Figure C-33 : Plaque fabriquée avec 12 variantes

Parmi ces variantes, nous allons nous focaliser sur les résultats électriques de la matrice de type oscillante. Ce circuit s'avère être le plus prometteur compte tenu des optimisations choisies (métallisation oscillante et contact *p* rapproché) qui diminuent le risque de contact avec les billes d'hybridation.

C.II.3 - Comportement électrique du circuit modifié

Les modifications technologiques sont susceptibles de dégrader le comportement électrique des diodes ; ainsi, l'étude électrique des matrices planes se révèle importante.

Les verrous technologiques à vérifier sont les suivants :

- récupération du contact substrat,
- comportement électrique des ponts métallisés : interconnexions fonctionnelles,
- comportement électrique des pixels proches des tranchées,
- tenue de l'hybridation.

C.II.3.1 - Influence de la gravure

Le risque principal est d'avoir dégradé le comportement des diodes par la gravure des tranchées (par usinage ionique) ou des contacts substrat (gravure chimique) à proximité des pixels. Le premier test électrique a permis d'étudier la distance sur laquelle ces deux types de gravure dégradent le matériau. Pour cela, un motif de test dédié a été fabriqué (Figure C-34).

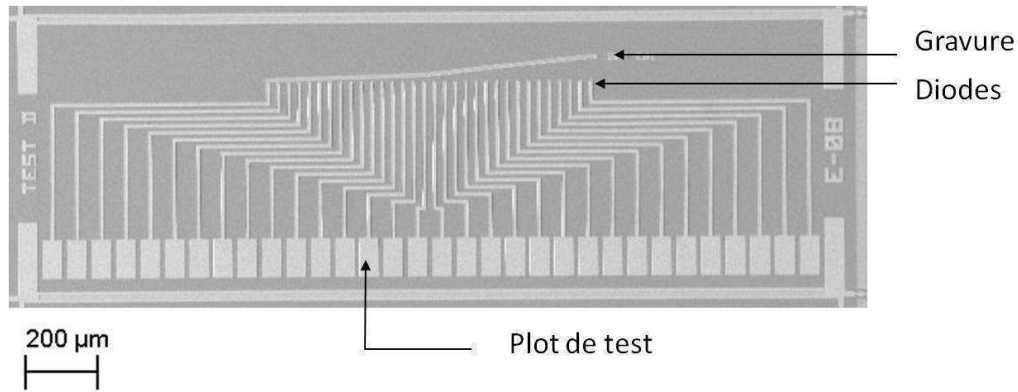


Figure C-34 : Motif de dégradation des diodes

Ce motif est composé de plots de test, de diodes et d'une gravure réalisée soit par :

- usinage ionique : équivalent à la fabrication des membranes, la gravure est une tranchée de largeur 10 µm ou 5 µm.
- chimie : équivalent à la fabrication du contact substrat (CTS), la gravure est un disque de diamètre 18 µm (similaire à la gravure du cadre CTS) ou de 4 µm (gravure du contact p rapproché).

La distance entre ces gravures et les diodes est croissante (1 µm à 60 µm), ce qui permet de déterminer la distance de dégradation de la zone gravée. La Figure C-35 illustre ces motifs.

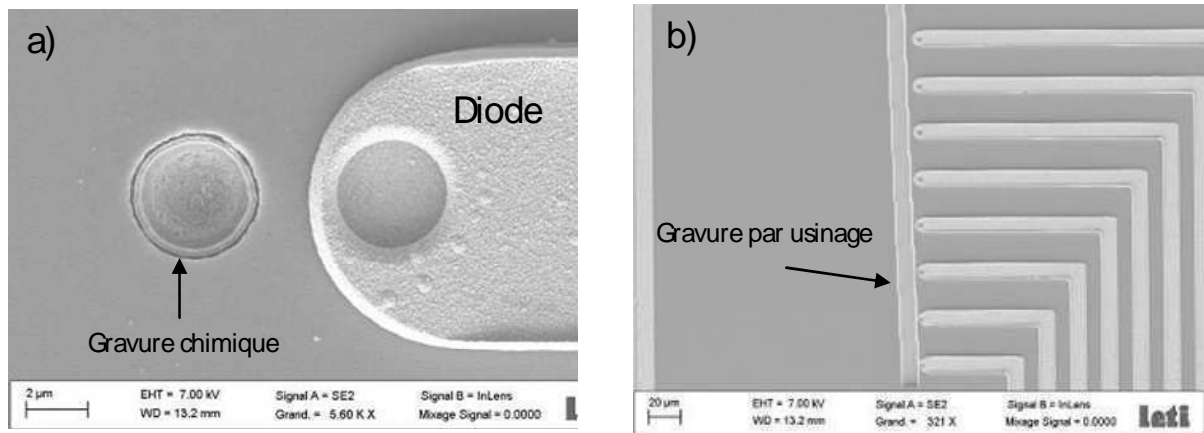


Figure C-35 : Agrandissement au niveau de la diode et du motif gravé : gravure chimique (trou) photo a) et par usinage ionique (tranchée) photo b). Photos au microscope électronique à balayage

Les tests électriques ont consisté à mesurer le courant I en fonction de la tension appliquée V , pour chacune de ces diodes. Selon le niveau de réponse de la diode, on peut évaluer la dégradation causée dans le matériau par la gravure.

Les distances de dégradation sont présentées dans le Tableau C-4 pour les quatre variantes de gravure et pour les trois substrats CdHgTe utilisés pour fabriquer les matrices (plaque 3010, 3011, 3013).

Distance minimale entre la gravure et la diode	Gravure usineur ionique de largeur :		Gravure chimique de diamètre :	
	5 μm	10 μm	Φ 4 μm	Φ 18 μm
Plaque 3010	48 μm	55 μm	10 μm	4 μm
Plaque 3011	52 μm	61 μm	2 μm	4 μm
Plaque 3013	34 μm	48 μm	3 μm	3 μm

Tableau C-4 : Distance minimale entre la gravure et la diode afin que la diode soit fonctionnelle selon les 4 variantes de gravure (usinage et chimie) et les 3 substrats utilisés (3010, 3011, 3013)

Les résultats sur les trois plaques sont relativement constants et permettent de conclure quant à la dégradation du fonctionnement électrique de la diode par rapport à la forme et la distance de la gravure.

L'usineur ionique dégrade le matériau sur une largeur inférieure à deux pas pixels. L'évolution semble croissante avec la longueur gravée, mais ne permet pas de statuer sur les dimensions des tranchées réalisées. En effet, elles ont une largeur minimale de 60 μm , cette dimension n'a pas été réalisable sur le motif de test. Au contraire, la gravure chimique modifie très faiblement le comportement des diodes, et de plus, le diamètre de la gravure influe peu. La distance de dégradation reste inférieure à 5 μm , à l'exception de la plaque 3010 gravée avec un diamètre de 4 μm , qui semble donc être une erreur de manipulation.

Ce premier test a permis de s'assurer de la fonctionnalité des mini-matrices. Les pixels ne sont pas dégradés électriquement par la gravure des contacts CTS, la largeur de dégradation étant inférieure à l'écart prévu entre le contact substrat et les diodes. Par contre, l'influence de la gravure pas usinage doit être vérifiée sur les matrices, étant donné que la longueur des tranchées réalisées est plus importante que celle faite sur le motif de test.

C.II.3.2 - Matrice « œil d'insecte »

Les circuits composés de tranchées oscillantes sont hybridés et testés électriquement dans l'environnement cryogénique usuel. Dans le procédé standard, les circuits sont traités antireflets, amincis et reportés sur des substrats particuliers pour former les imageurs fonctionnels. Ces étapes ne sont pas réalisées sur les matrices modifiées puisqu'elles doivent être amincies et courbées par la suite.

Les matrices testées de type oscillantes, sont notées selon leur longueur de tranchée T : 120 μm , 240 μm , 480 μm . Elles sont issues de deux substrats différents, notés 3011 et 3013, qui varient selon leurs longueurs d'onde de coupure λ_c , respectivement de 4,52 μm et 3,92 μm à température ambiante.

C.II.3.2.1 - Influence du substrat

La première étude électrique porte sur la mesure de l'intensité totale débitée par les diodes lorsque le détecteur actif. En pratique, un corps noir à 25°C est placé devant le détecteur, créant un courant photonique qui s'ajoute au courant d'obscurité de la diode. Ce courant total est lu au travers d'une capacité de charge ; le temps d'intégration est ajusté en début de caractérisation afin de se placer à mi-dynamique, c'est-à-dire sur la partie linéaire du chargement.

Le tableau ci-dessous montre les intensités moyennes obtenues sur les matrices modifiées.

Matrice	Substrat	λ_c à 300K	Intensité mesurée
T – 120 μm	3011	4,52 μm	~700 pA
T – 240 μm	3013	3,92 μm	~100 pA
T – 480 μm	3013	3,92 μm	~100 pA

Tableau C-5 : Intensité mesurée sur les matrices oscillantes avec une largeur de tranchée variable

On observe que l'intensité est faible, de l'ordre de la centaine de pico ampères, et constante pour un même substrat gravé avec des longueurs de tranchée différentes. Ce paramètre n'est donc pas influent, par contre, la longueur d'onde de coupure du substrat influe sur cette valeur d'un facteur 7.

La comparaison avec les grandeurs standards ne peut être réalisée qu'avec des matrices semblables, c'est-à-dire avec un substrat ayant la même composition et une structure photovoltaïque équivalente (diodes mécaniques de faible diamètre et contact p rapproché). Un projet interne au département répond à ces critères. Le Tableau C-6 compare ces résultats électriques à ceux obtenus sur les circuits réalisés au cours de ma thèse.

Projet	λ_c @ 300K	λ_c @ 77K	Intensité mesurée
ARCADIE	4,16 μm	4,9 μm	112 pA
Matrice 3011	4,52 μm	5,53 μm	700 pA
Matrice 3013	3,92 μm	4,54 μm	100 pA

Tableau C-6 : Comparaison électrique en fonction de la longueur d'onde du substrat

Ce tableau permet de confirmer l'influence du substrat sur le résultat. Pour une longueur d'onde proche de 4 μm à 300K, l'intensité mesurée sur la matrice ARCADIE est du même ordre de grandeur que la matrice 3013. La différence de la dizaine de pico ampère s'explique d'une part par le petit écart en longueur d'onde de ces deux plaques, et d'autre part, par la différence technologique qui existe malgré tout entre ces deux circuits.

Pour comparaison, un composant IR-CMOS standard MWIR a une intensité de 1,5 nA et pour un substrat LWIR (longueur d'onde plus grande) l'intensité est de 10 nA. Ces valeurs sont mesurées sur des pixels avec un fort taux de remplissage (surface du pixel actif égale à la surface définie par le pas pixel) ce qui n'est pas le cas sur les matrices de mon étude.

Cette comparaison conclut donc sur la cohérence des résultats obtenus ; la faible intensité mesurée n'est pas due au dysfonctionnement de la structure, mais principalement à la technologie « petites diodes » réalisée, et à la longueur d'onde de coupure du substrat.

C.II.3.2.2 - Influence des tranchées

L'étude de la matrice entière permet d'évaluer la dégradation apportée par les tranchées sur le fonctionnement des mini-matrices. La Figure C-36 présente la cartographie du circuit modifié T – 480 μm lorsqu'il image un corps noir de 20°C, les tranchées sont en bleu.

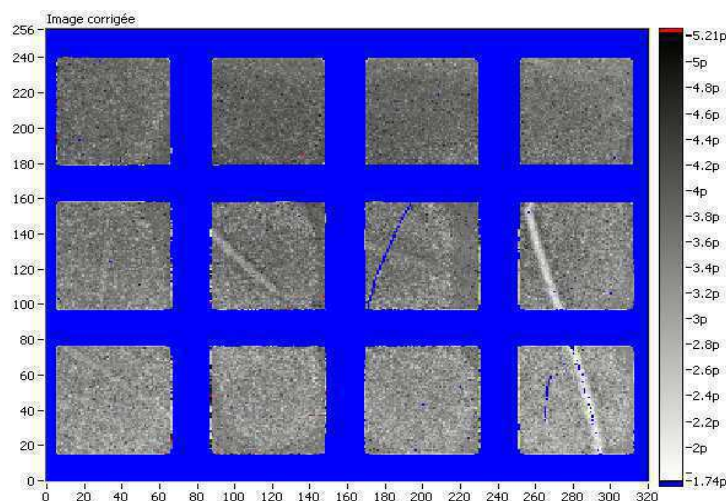


Figure C-36 : Caractérisation électrique de la matrice modifiée T – 480 μm

Les agrandissements au niveau d'une mini-matrice (Figure C-37) montrent le comportement électrique des diodes proches des tranchées.

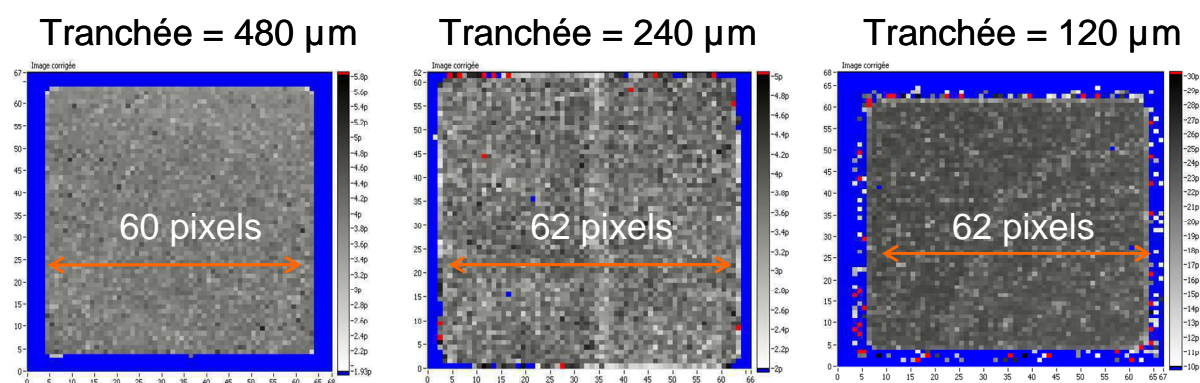


Figure C-37 : Agrandissements sur une mini-matrice pour les 3 longueurs de tranchée
La zone bleue est la tranchée, la tension mesurée sur chaque pixel varie dans une gamme définie.

Pour les trois longueurs de tranchées, la mini-matrice, théoriquement de 64 pixels, possède une à deux diodes non fonctionnelles sur sa périphérie. L'usinage ionique a donc effectivement dégradé les diodes de proximité sur une longueur de 60 μm (soit deux diodes). Cette distance est celle obtenue sur le motif de test réalisé précédemment avec des largeurs gravées bien plus faibles (10 μm maximum).

La gravure des interconnexions dégrade donc le matériau sur une à deux diodes, ce qui altère l'opérabilité de 5 % à 10 %. Au-delà des deux pixels, le fonctionnement est uniforme comme on peut le voir sur ces images.

L'évaluation électrique des matrices est faite par la mesure de la réponse en courant du détecteur et de la dispersion (Tableau C-7). Ce paramètre permet de caractériser le niveau de

contraste de la matrice que l'on peut également définir comme la sensibilité du détecteur à une variation du flux incident. Un écart en courant ΔI mesuré permet de remonter à une différence de température ΔT c'est-à-dire à une variation de flux incident grâce aux lois pour le corps noir que j'ai définies en introduction de ce chapitre.

En pratique, le détecteur est caractérisé sous deux températures du corps noir (20°C et 30°C).

Matrice	Substrat	λ_c à 300K	Réponse en courant	Dispersion
T – 120 μ	3011	4,52 μ m	21,53 pA/K	11 %
T – 240 μ	3013	3,92 μ m	3,46 pA/K	11,5 %
T – 480 μ	3013	3,92 μ m	3,48 pA/K	12 %

Tableau C-7 : Réponse en courant des circuits de détection

Les matrices issues du même substrat 3013 présentent, malgré leurs longueurs de tranchées différentes, une réponse électrique identique. Lorsque la longueur d'onde de coupure augmente, le matériau est plus sensible à la variation de flux ; la réponse mesurée est plus importante. Le même facteur 7 décrit la variation des réponses mesurées avec la composition du substrat. Ces matrices présentent une dispersion de 10 % qui est constante malgré la variabilité des matrices.

Compte tenu de la structure type « œil d'insecte » réalisée, il n'est pas possible de comparer ces résultats avec des projets antérieurs. Néanmoins, j'ai constaté un fonctionnement correct de ces nouvelles matrices avec une réponse en courant dans l'ordre de grandeur des circuits refroidis.

Vers la courbure sphérique des détecteurs infrarouge refroidis

Ces résultats sont les premiers pas vers la courbure complexe des détecteurs infrarouge refroidis. La stratégie pour ces détecteurs consiste à courber pleine puce le Si-CMOS et à structurer le circuit de détection en réalisant des groupes de pixels. Cette architecture facilite la mise en forme sphérique du circuit CdHgTe car sa composition chimique, garante de la détection infrarouge, est particulièrement sensible à tout apport d'énergie ou de contrainte.

La matrice de détection a été modifiée pour former des groupes de 64x64 pixels interconnectés par des liaisons métalliques souples. Une fois le substrat aminci, ces interconnexions forment des ponts souples qui permettent la mise en forme sphérique.

Cette matrice de type « œil d'insecte » a donné lieu à des innovations technologiques qui ont été testées électriquement. Les résultats montrent que la structure n'a pas modifié le comportement électrique du circuit. Par conséquent, la courbure de l'ensemble du composant infrarouge peut être envisagée. Ce projet plus complexe fait partie des perspectives de ma thèse.

C.III - La courbure des bolomètres

Contrairement aux détecteurs refroidis, les bolomètres sont des détecteurs dits « above IC », c'est-à-dire que la matrice de pixels sensibles est directement réalisée sur un circuit de lecture Si-CMOS. Ces détecteurs, composés majoritairement de silicium, sont courbés pleine puce en fin de procédé de fabrication (composants sur étagère).

Le procédé de courbure est réalisé sur ces détecteurs avec les optimisations propres à la courbure de composants fonctionnels, que j'ai détaillées dans la première partie de ce chapitre.

C.III.1 - Rappel du fonctionnement des bolomètres

Les bolomètres sont des détecteurs thermiques dans la bande $8\ \mu\text{m}$ - $12\ \mu\text{m}$. Leur fonctionnement repose sur la conversion du rayonnement infrarouge en une élévation de température, mesurée par la variation de la résistance du matériau. Le rayonnement infrarouge est absorbé par une membrane sensible en silicium amorphe qui définit le pixel. Cette planche est en suspension au dessus du circuit de lecture ; la cavité quart d'onde ainsi formée est garante de la sensibilité du détecteur au rayonnement infrarouge. Après absorption, le flux thermique est converti en une élévation de température qui est traduite par une variation de résistance que l'on mesure.

Cependant, cette valeur mesurée prend également en compte la résistance interne au matériau, le bruit du circuit. Afin de distinguer l'unique contribution du flux infrarouge, le comportement propre du circuit est caractérisé par des bolomètres mécaniques, ou de compensation, situés en périphérie de la matrice sensible. Ces bolomètres aveugles au rayonnement infrarouge mesurent la tension et le bruit du circuit seul, ce qui correspond au niveau de recharge défini sur le Si-CMOS. La tension proportionnelle au flux incident est obtenue en deux étapes. La première consiste à supprimer dans l'intensité mesurée le courant du niveau de recharge (circuit de compensation), puis la conversion courant / tension est réalisée grâce à un circuit intégrateur (Minassian et al. 2008).

Le schéma de la Figure C-38 a illustre l'architecture d'un pixel. La Figure C-38 b montre l'architecture d'un microbolomètre avec la matrice sensible et à sa gauche sur l'image se trouve le routage du circuit Si-CMOS.

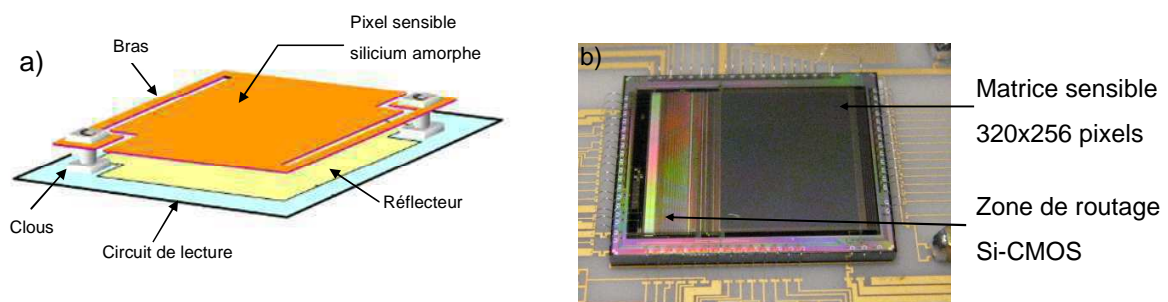


Figure C-38 : Structure d'un bolomètre a) pixel sensible ; b) matrice

La structure bolométrique nécessite la fabrication de membranes en silicium amorphe ; elles sont maintenues en suspension au dessus du circuit de lecture par des « clous » et des « bras » (Vedel et al. 1999). Les clous forment les interconnexions entre le circuit de lecture et la planche, alors que les bras sont de fines bandes de silicium qui connectent la planche aux clous (Figure C-38). Les bolomètres de compensation, ne mesurant pas le flux infrarouge, ont une membrane plus large que les bolomètres sensibles et leurs bras sont inexistant.

Technologiquement, la matrice de pixels est fabriquée sur le circuit de lecture par des étapes de micro-technologie réalisées au sein du CEA Léti (Figure C-39). Une couche de polymère est déposée au dessus du CMOS, afin de former les pixels en silicium amorphe selon la géométrie décrite précédemment. La dernière étape consiste à supprimer la couche de polymère afin de libérer les planches de silicium et définir ainsi la cavité sensible. Cette étape est réalisée par un plasma ozone qui permet d'éliminer le polymère sous le silicium amorphe. Les planches sont alors en suspension au dessus du circuit et maintenues par les clous, cette étape est appelée libération. Une fois que les pixels sont libérés, le composant est câblé sur une céramique d'interconnexion par une technique de câblage filaire. Ces capteurs fonctionnent sous vide à température ambiante, contrairement aux détecteurs photovoltaïques en CdHgTe ; ils sont ainsi montés dans une enceinte thermique sous vide (ETSV).

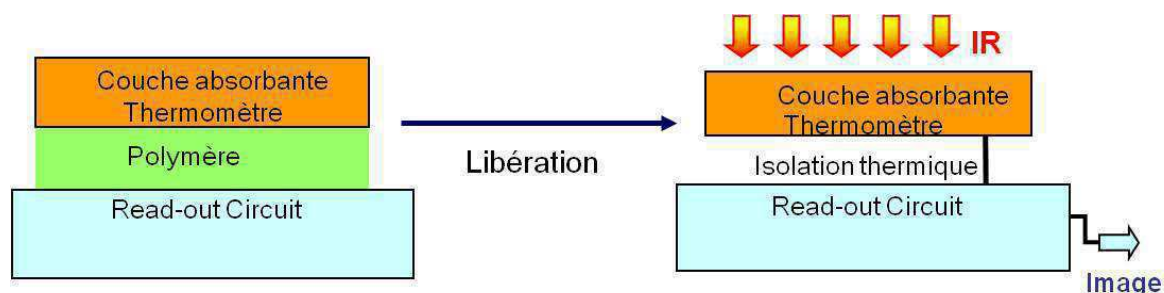


Figure C-39 : Fin du procédé de fabrication d'un bolomètre standard

Les véhicules de test de la thèse sont des matrices TV/4, 320x256 pixels, au pas de 25 μm . La première partie de ce chapitre a démontré que le circuit de lecture Si-CMOS pouvait être courbé sans cliver ; le fonctionnement électrique n'est dégradé ni par l'amincissement ni par les étapes de courbure. Les résultats de cette étude ont montré qu'un circuit Si-CMOS courbé à 69,7 mm est fonctionnel électriquement. Le verrou technologique de la courbure des bolomètres est la matrice de pixels, en raison de sa structure fragile (cavités $\lambda/4$). Il faut donc vérifier l'influence de la courbure sur la structure particulière des pixels.

L'étude a été menée en premier lieu sur des structures mécaniques, avant d'être appliquée à des composants fonctionnels.

C.III.2 - Courbure des bolomètres sur réseau d'interconnexion

Les premiers essais de courbure ont été effectués avec des bolomètres mécaniques. Sur ces composants, le circuit de lecture est un réseau d'interconnexion qui ne permet de collecter la résistance électrique que de quelques pixels de la matrice. Ces bolomètres ont une dimension totale légèrement inférieure aux bolomètres fonctionnels sur CMOS.

C.III.2.1 - Procédé de courbure utilisé

Les bolomètres de cette étude sont des composants de filière classique dont les dimensions (planche et bras) sont standards. Ils sont courbés en fin de fabrication de la matrice sensible mais avant l'étape de libération (Figure C-40). Ainsi, leur structure est protégée par le polymère pendant la courbure.

Le procédé de courbure est identique à celui développé pour la courbure du Si-CMOS :

- les composants sont amincis en unitaire à l'épaisseur de 50 μm ,
- la surface active est protégée par le report d'un film polymère protégeant les pixels sensibles et les plots de connexion,
- les supports de courbure sont découpés à la taille du détecteur.

Deux types de support ont été choisis : les verres de montre utilisés dans les études précédentes, et des lentilles. Leur choix fait suite aux conclusions de l'étude matériau. La courbure des détecteurs fonctionnels profite ainsi d'un meilleur état de surface (meilleure homogénéité du rayon sur la surface).

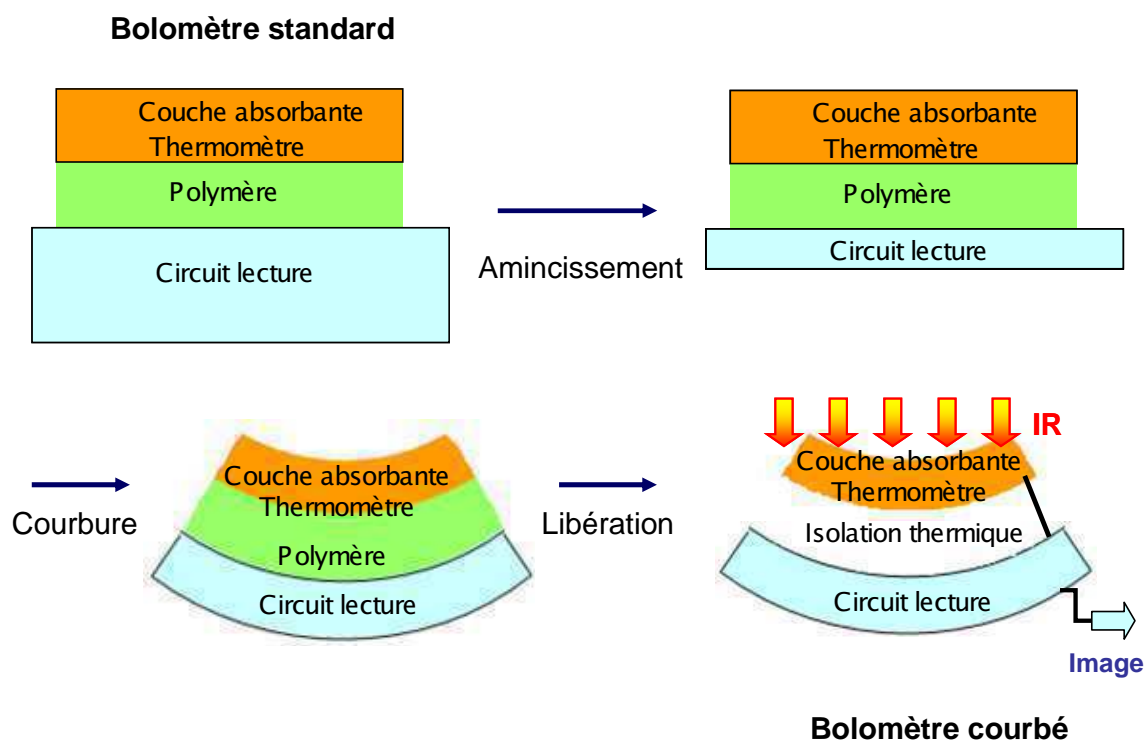


Figure C-40 : Procédé de courbure des bolomètres à partir d'un composant sur étagère

Après la courbure, le procédé standard est poursuivi. L'étape de gravure plasma permet de libérer les planches, mais elle nécessite cependant une adaptation. En effet, lors de la gravure plasma, le composant unitaire est déposé dans l'équipement sur une tranche de silicium qui est chauffée afin d'améliorer l'interaction entre le plasma et le composant.

Le bolomètre standard est directement au contact d'une tranche de silicium. Au contraire, les bolomètres courbés sont libérés alors qu'ils sont reportés sur un support en verre. Cette épaisseur isole thermiquement le composant ; de plus, dans le cas des supports en verre de

montre, la surface d'échange est plus faible. Les schémas de la Figure C-41 illustrent ces trois configurations.

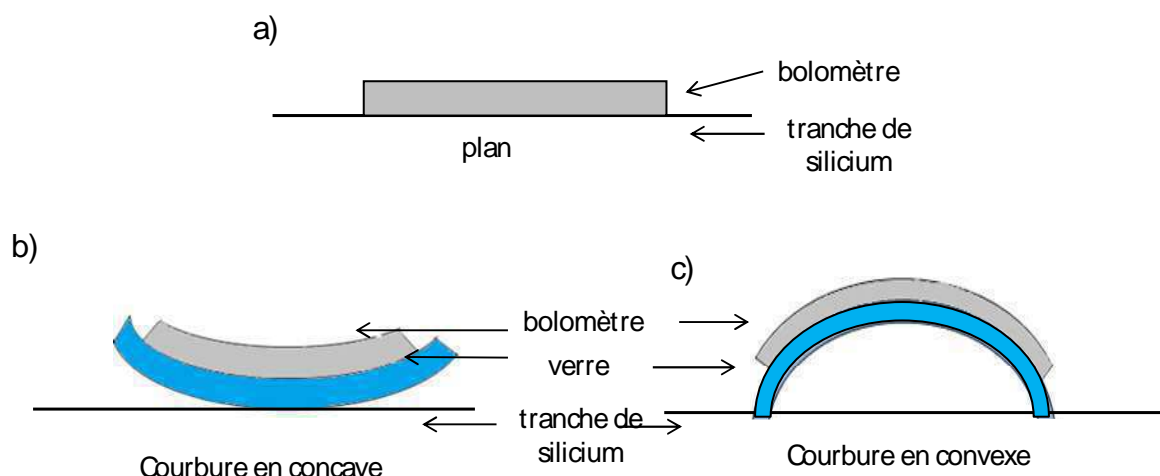


Figure C-41 : Problème thermique lors de l'étape de libération des pixels bolométriques
Le composant plan est au contact sur toute sa surface a) ; les composants courbés sont partiellement en contact b) en concave, c) en convexe

Le temps de la gravure plasma doit donc être ajusté pour libérer toutes les planches. Il apparaît que les zones en contact de la tranche de silicium se libèrent plus vite que celles séparées d'une lame d'air. Ainsi, le temps de libération doit être prolongé, notamment pour la configuration convexe, ce qui augmente également l'échauffement du composant soumis au plasma. Or la structure bolométrique est particulièrement sensible à une exposition prolongée à haute température. Les bras notamment, peuvent rompre par le contact prolongé du plasma à haute température.

C.III.2.2 - Résultats de courbure

Plusieurs bolomètres ont été courbés et les résultats de courbure sont présentés dans le Tableau C-8. La courbure est caractérisée au profilomètre optique. Les critères de caractérisation sont similaires à ceux définis lors de l'étude silicium et du circuit Si-CMOS. Les paramètres analysés sont :

- l'écart entre les rayons de courbure du support et du bolomètre,
- le nombre et l'amplitude des pliures.

Les rayons donnés sont les rayons des surfaces sphériques parfaites.

Bolomètre sur réseau d'interconnexion	Rayon parfait du support	Rayon parfait du bolomètre	Ecart entre rayon (ΔR) ou entre flèche (Δf) support / CMOS	Pliure
Convexe 1	48,5 mm	47,5 mm	$\Delta R = 1 \text{ mm}$ $\Delta f = 7 \text{ } \mu\text{m}$	2 pliures : 127 μm – 131 μm
Convexe 2	48,5 mm	51,2 mm	$\Delta R = 2,7 \text{ mm}$ $\Delta f = 20 \text{ } \mu\text{m}$	2 pliures : 30,5 μm – 104 μm
Convexe 3	49,5 mm	47,2 mm	$\Delta R = 2,3 \text{ mm}$ $\Delta f = 18 \text{ } \mu\text{m}$	1 pliure : 67,4 μm

Concave 1	48,8 mm	51 mm	$\Delta R = 2,2 \text{ mm}$ $\Delta f = 15 \mu\text{m}$	Pas de pliure
Concave 2	49,7 mm	50,5 mm	$\Delta R = 0,8 \text{ mm}$ $\Delta f = 6 \mu\text{m}$	Pas de pliure

Tableau C-8 : Courbures convexe et concave réalisées sur des bolomètres sur réseau d'interconnexion
(Précision de mesures des rayons +/- 75 μm)

Les écarts entre les rayons de courbure sont faibles, entre 1 mm et 2 mm. La courbure convexe présente des pliures sur la périphérie. Les amplitudes et le nombre des pliures sont comparables à celles mesurées au silicium nu. Les courbures concaves sont, quant à elles, parfaitement sphériques. Ces résultats sont similaires aux résultats expérimentaux obtenus sur les carrés de silicium et le circuit Si-CMOS.

Les images de la Figure C-42 et de la Figure C-43 présentent l'analyse au profilomètre optique des bolomètres courbés en convexe (convexe 1) et en concave (concave 1). La première image est la surface balayée par la sonde optique, la deuxième correspond à la surface parfaitement sphérique et la dernière est la surface des défauts à la sphère. Ces caractérisations ont nécessité l'assemblage de quatre surfaces afin de couvrir la flèche avec la sonde optique. De ce fait, les surfaces présentent des zones non mesurées (en jaune) ou des artefacts, telles que les traces bleues sur la surface des écarts à la sphère dans la Figure C-42 C et Figure C-43 C. La caractérisation convexe montre les deux pliures sur la périphérie du composant, tandis que le bolomètre concave est parfaitement sphérique.

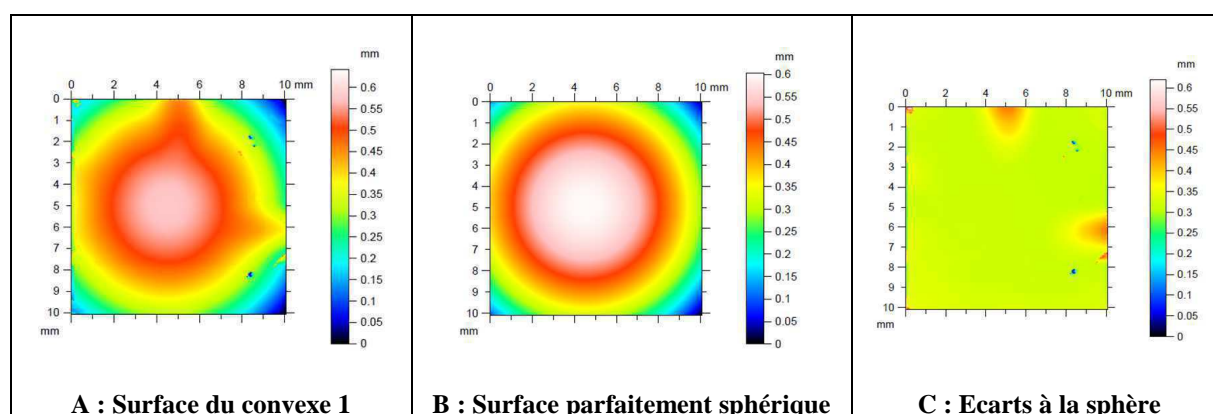


Figure C-42 : Caractérisation au profilomètre optique du bolomètre courbé en convexe 1

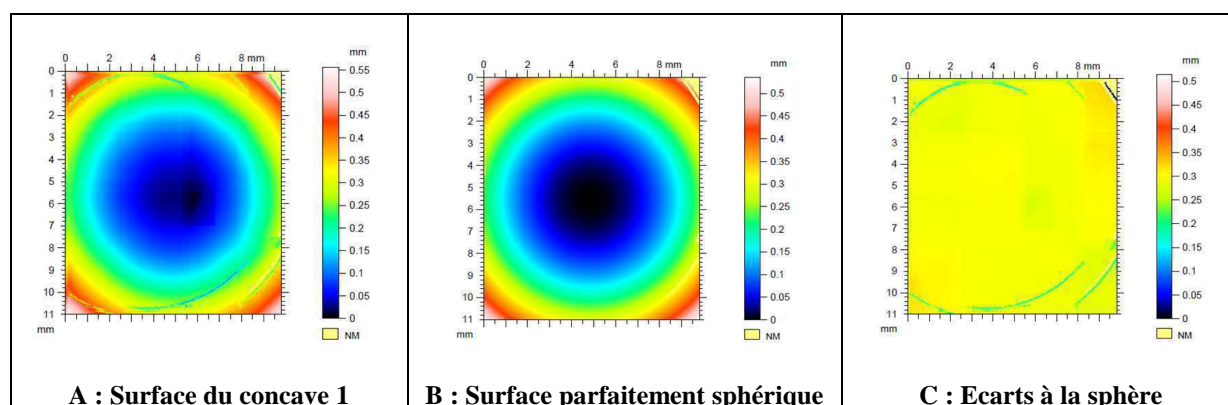


Figure C-43 : Caractérisation au profilomètre optique du bolomètre courbé en concave 1

C.III.2.3 - Influence de la courbure sur les pixels

La mise en forme sphérique déforme le composant et à l'échelle du pixel elle peut modifier la géométrie de la cavité. Ce risque est majeur au niveau des pliures où la déformation brusque du matériau peut créer une fragilité sur les pixels à proximité.

La Figure C-44 A permet de visualiser la matrice des pixels sensibles par rapport à la surface totale du composant. Il apparaît que les pliures sont principalement situées en dehors de la zone d'intérêt pour la détection. L'analyse au profilomètre avec un faible pas d'échantillonnage (3 μ m) permet de voir les planches des pixels situés à proximité des grandes déformations (Figure C-44 C-D). Elles ne semblent pas dégrader par la courbure.

L'observation au microscope électronique à balayage de la matrice, et notamment des pixels proches des zones fortement contraintes, a permis de vérifier notamment, que la cavité $\lambda/4$ est conservée. Ces images ne peuvent pas être présentées pour des raisons de confidentialité de la technologie des bolomètres.

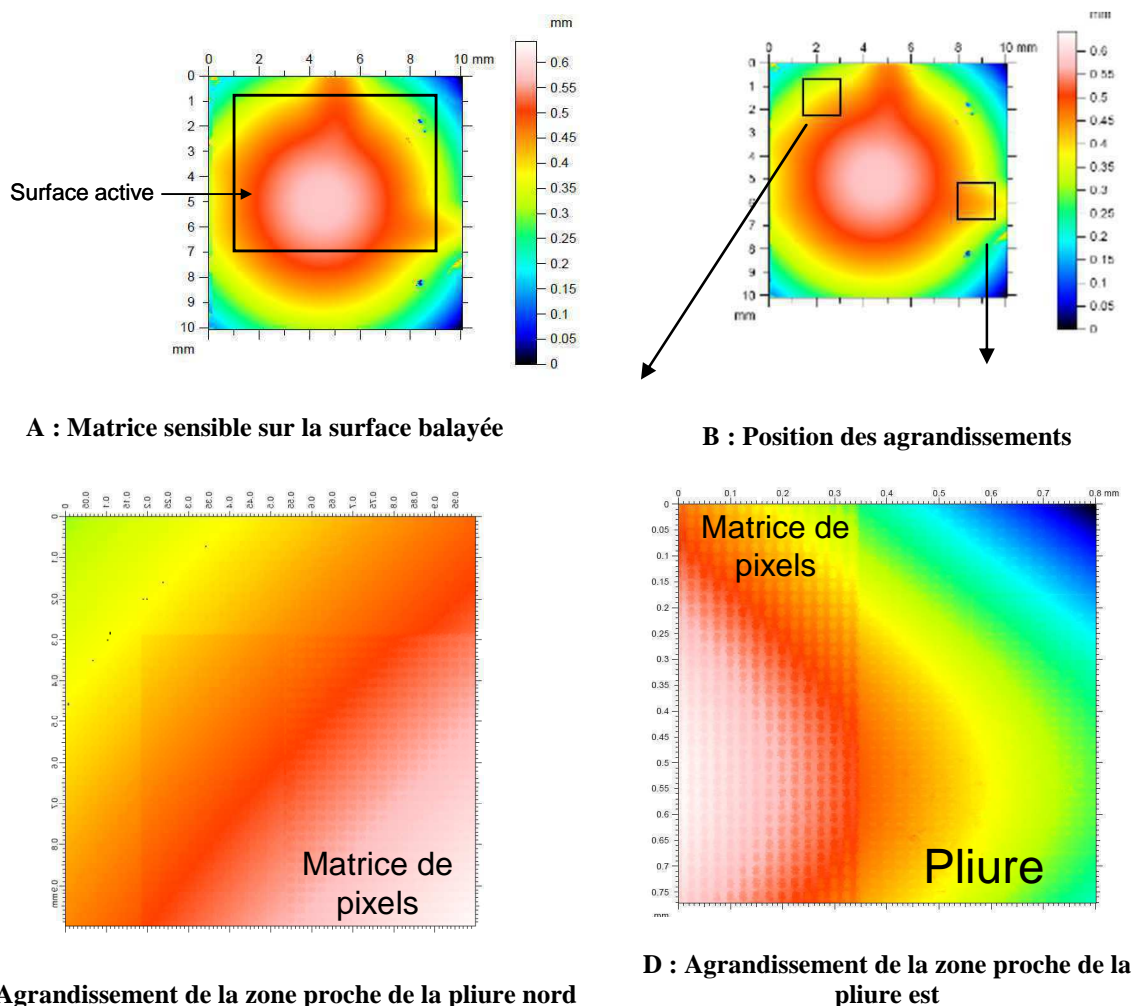


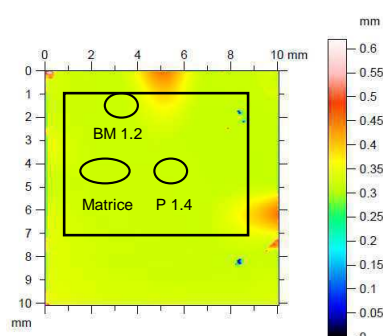
Figure C-44 : Images issues de l'analyse au profilomètre optique du bolomètre courbé en convexe (convexe 1). Les pliures sont majoritairement hors de la surface active (A) comme l'illustrent les deux agrandissements (C et D) des carrés de la figure B.

C.III.2.4 - Analyse électrique

C.III.2.4.1 - Comportement électriques des bolomètres

L'analyse du comportement électrique des pixels va permettre de confirmer ces observations. Le réseau d'interconnexion sur lequel sont fabriqués ces bolomètres, permet de mesurer électriquement la résistance de quelques pixels. La Figure C-45 présente les zones d'intérêt :

- une mini-matrice de 10x10 bolomètres sensibles notée *Matrice*,
- quatre pixels distincts sur la matrice notés *P 1.4*,
- deux bolomètres mécaniques *BM* (ou de compensation) au nord de la matrice.



Test électrique	Variation de résistance $\Delta R/R$
Pixels sensibles <i>P1-4</i>	0,22 %
Bolomètres de compensation <i>BM 1-2</i>	- 5,33 %
Matrice de pixels <i>Matrice</i>	- 0,81 %

Figure C-45 : Pixels mesurés par le réseau d'interconnexion

Tableau C-9 : Comportement électrique du bolomètre convexe 1

L'étude électrique menée sur le bolomètre convexe 1 est présentée dans le Tableau C-9. Cette caractérisation électrique est obtenue à l'aide d'un test sous pointe et donne les valeurs de résistance des pixels. Ces valeurs sont comparées aux valeurs standards d'un bolomètre plan de référence du même lot. Les valeurs électriques des bolomètres ne peuvent pas être données pour des raisons de confidentialité ; l'étude est alors exprimée en pourcentage de variation.

Les bolomètres sensibles et la matrice de pixels ont une réponse très proche des tensions mesurées sur le détecteur plan : l'écart est inférieur à 1 %. La réponse des bolomètres de compensation est un peu plus faible que la réponse standard : l'écart est de 5 %. Néanmoins cet écart n'est pas pertinent compte tenu du nombre de bolomètres mesurés. En effet, la variabilité de réponse d'une matrice de bolomètre peut être importante, il est donc nécessaire de prendre en compte un plus grand nombre de pixels pour conclure.

Néanmoins, cette première estimation démontre que le comportement du bolomètre courbé en convexe est similaire au bolomètre de référence plan, notamment, les pliures ne nuisent pas au fonctionnement électrique du bolomètre courbé, étant donné que les tests sont effectués à leurs proximités.

C.III.2.4.2 - Orientation de la courbure

Le tableau ci-dessous (Tableau C-10) analyse l'influence du type de courbure (concave / convexe) sur le comportement électrique du bolomètre courbé par rapport au bolomètre plan standard. Les bolomètres testés sont le convexe 3 et le concave 2. Le test électrique est réalisé dans l'environnement thermique sous vide sur seize pixels. La caractérisation porte sur :

- la résistance des pixels : valeur moyenne des 16 pixels (équivalente aux mesures précédentes),

- la résistance thermique mesurée sur le composant fonctionnant sous vide,
- le bruit en $1/f$ du pixel.

Configuration de courbure	Ecart plan / concave	Ecart plan / convexe	Ecart concave / convexe
Résistance	12,12 %	11,14 %	0,98 %
Résistance thermique	20,47 %	14,35 %	6,12 %
Bruit en $1/f$	5,16 %	6,72 %	2,75 %

Tableau C-10 : Comportement électrique des bolomètres concave et convexe

La résistance mesurée dans les deux orientations varie de 11 % ; cet écart est plus important sur la résistance thermique (14 % à 20 %). Par contre, la variation mesurée sur le bruit est faible (6 %) ; c'est une valeur standard de la mesure de bruit.

La comparaison selon la courbure concave et convexe montre une faible variation entre ces deux types de courbure. La résistance a une variation inférieure à 1 %, une variation de résistance thermique de 6 % et un bruit inférieur à 3 %. Ce résultat est d'autant plus important que la courbure convexe a des pliures en périphérie. Cette comparaison confirme donc la conclusion des analyses précédentes : les pliures n'endommagent pas le fonctionnement du bolomètre.

Courbure & pixels

La résistance des pixels semble diminuer faiblement avec la courbure. Cependant, la faible statistique de ces analyses ne permet pas de conclure définitivement sur la dégradation des résistances lors de la mise en forme sphérique. Les tests électriques sur le composant fonctionnel permettront d'avoir un recul supplémentaire.

C.III.3 - Courbure des bolomètres fonctionnels

Cette partie va se focaliser sur la courbure de bolomètres fonctionnels, avec un circuit de lecture Si-CMOS. La caractérisation électrique de la matrice sensible sera effectuée à chaque étape.

C.III.3.1 - Résultats de courbure

Les bolomètres peuvent être courbés en convexe et en concave. Néanmoins, je me suis concentrée sur la courbure concave : cette forme permet de répondre aux applications de correction d'aberration de courbure de champ, qui constituent la demande principale à ce jour.

L'étude du circuit de lecture a montré que le Si-CMOS était fonctionnel pour un rayon de courbure de 69,7 mm en concave. J'ai donc choisi de débiter cette étude par des rayons

supérieurs à cette valeur, afin de m'assurer de la fonctionnalité du détecteur après courbure. Le tableau ci-dessous présente les résultats de courbure des différents essais réalisés.

Bolomètre	Rayon parfait du support (mm)	Rayon parfait du détecteur (mm)	Ecart entre rayons (mm)	Ecart entre flèches (μm)
n°1	77,8	80,3	2,5	7
n°2	77,8	77	0,8	3
n°3	74,4	75,3	0,9	3
n°4	69,7	73	3,3	12
n°5	77,8	80,6	2,8	8

Tableau C-11 : Résumé des courbures des bolomètres fonctionnels
Rayon mesuré sur la sphère parfaite précision $\pm 75 \mu\text{m}$

Les rayons obtenus varient de 73 mm à 80 mm. L'écart entre le rayon de verre support et le rayon du bolomètre est de 2 mm à 3 mm. L'écart en flèche est majoritairement inférieur à 10 μm , ce qui correspond au critère d'écart à la sphère parfaite défini précédemment (chapitre B). Ces courbures concaves ne présentent aucune pliure sur la périphérie.

C.III.3.1.1 - Caractérisation de la surface

Les Figure C-46 présentent l'analyse au profilomètre optique de la surface de ces détecteurs. On peut voir clairement que ces bolomètres sont parfaitement sphériques ; l'écart à la sphère (Figure C-46 C) présente une uniformité en altitude sur toute la surface qui se caractérise par la couleur uniforme. La caractérisation avec un faible pas d'échantillonnage du bolomètre n°4 permet de distinguer la structure du circuit de lecture, dont les lignes métalliques du routage.

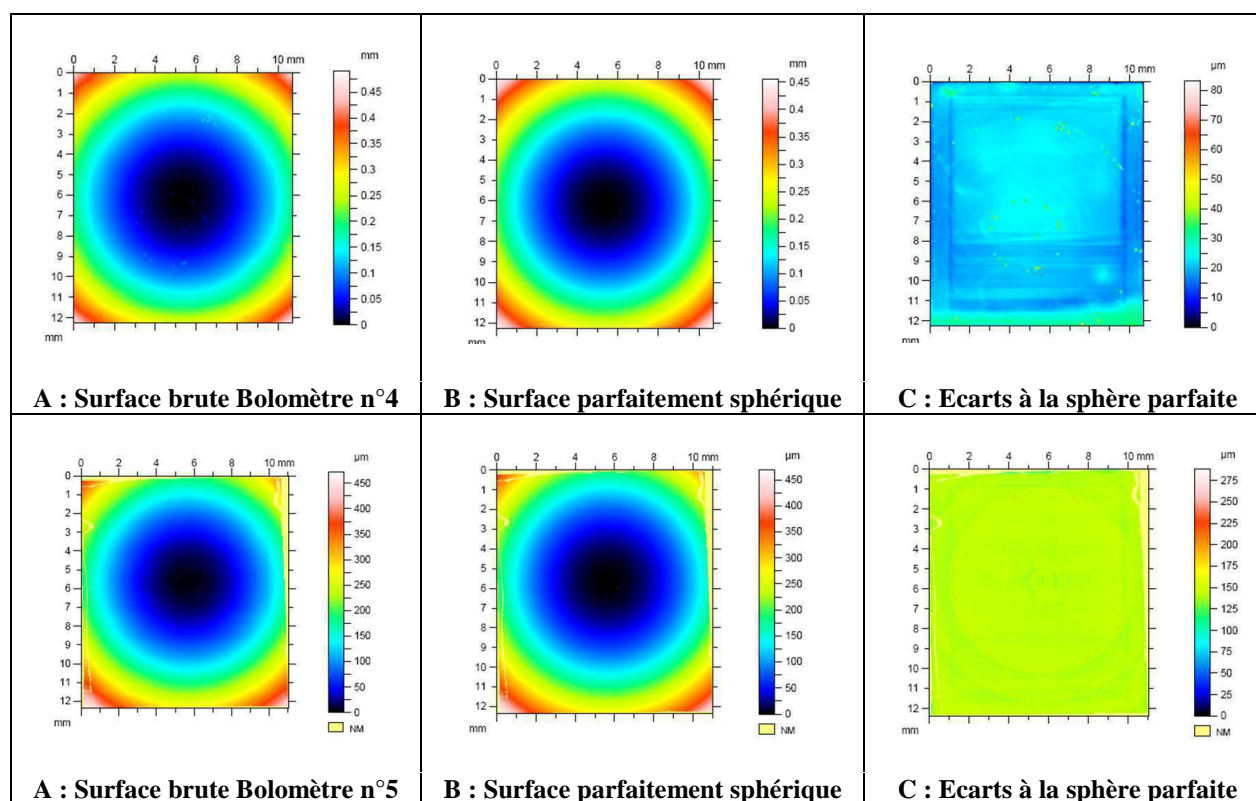
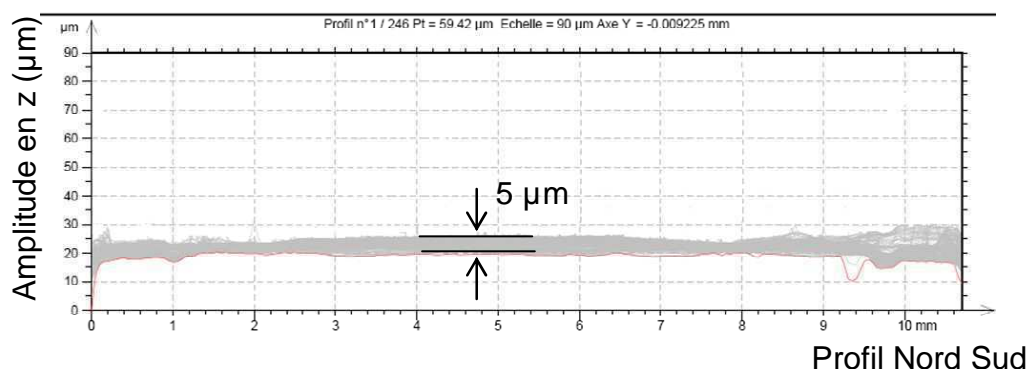


Figure C-46 : Caractérisation au profilomètre mécanique des deux bolomètres concaves n°4 et n°5

C.III.3.1.2 - Evaluation du défaut de planéité

Les écarts à la sphère sont caractérisés par une analyse supplémentaire qui consiste à traduire ces figures en une série de profils. La Figure C-47 présente le balayage du composant, du nord au sud, avec 246 profils. On peut ainsi obtenir la variation d'altitude de la surface qui est évaluée à 5 μm . Cet écart très faible correspond à la flèche critique de courbure que j'ai définie dans le chapitre B. Les bolomètres courbés répondent donc au cahier des charges en termes de sphéricité et d'exigences morphologiques (écart entre rayons, pliures).



**Figure C-47 : Surface des écarts à la sphère traduite en une série de profils
Mesure du défaut de planéité**

C.III.3.1.3 - Tenue mécanique des pixels

Une troisième analyse de la surface permet de vérifier la tenue mécanique des planches. En effet, le point dur de cette technologie est la structure des pixels formée par une membrane suspendue. Cependant grâce à cette structure, la déformation réelle des planches est faible. En effet, pour un composant courbé à un rayon de 73 mm, donc de 246 μm de flèche, la déformation d'un pixel unitaire n'est que de 1,07 μm . La structure bolométrique présente les mêmes avantages que la structure en île de matériau développée dans le chapitre B. Néanmoins, cette faible déformation peut être amplifiée par un effet électrostatique ; la membrane peut se coller au substrat et n'assume plus sa fonction de détection.

L'analyse en microscopie 3D de la surface du détecteur a permis d'observer les planches et de vérifier ainsi la géométrie de la cavité. Des zones prises aléatoirement au centre et en périphérie de la matrice, montrent que les planches ne sont pas affaissées par la courbure. Leur forme est similaire à celle observée sur les bolomètres plans. La forme générale de la courbure et un profil de la matrice sont tracés à la Figure C-48. Le rayon de courbure déterminé par cette méthode corrobore les résultats de caractérisation obtenus par profilométrie.

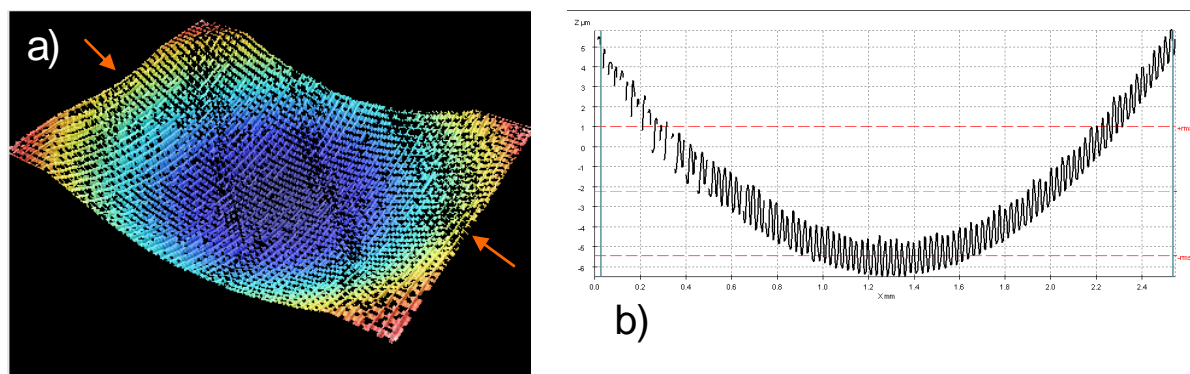


Figure C-48 : Caractérisation au microscope 3D de la courbure du bolomètre fonctionnel
a) Surface en 3 dimensions de la matrice de pixels sensibles ; b) profil de courbure selon les deux flèches orange de la figure a

C.III.3.1.4 - Libération des pixels

Après courbure, les planches bolométriques sont libérées par l'étape de gravure plasma. Certains bolomètres ont été dégradés par cette étape. Après la libération, la matrice de pixels présente des lignes horizontales ou verticales sur lesquelles la réflexion de la lumière diffère. Les planches bolométriques réfléchissant la lumière visible, il est possible d'évaluer à l'œil nu leurs déformations, et notamment leurs inclinaisons les unes par rapport aux autres. On observe que ces lignes se propagent dans la matrice de pixels et sont en réalité des lignes de clivage qui se poursuivent sur le circuit de lecture (Figure C-49).

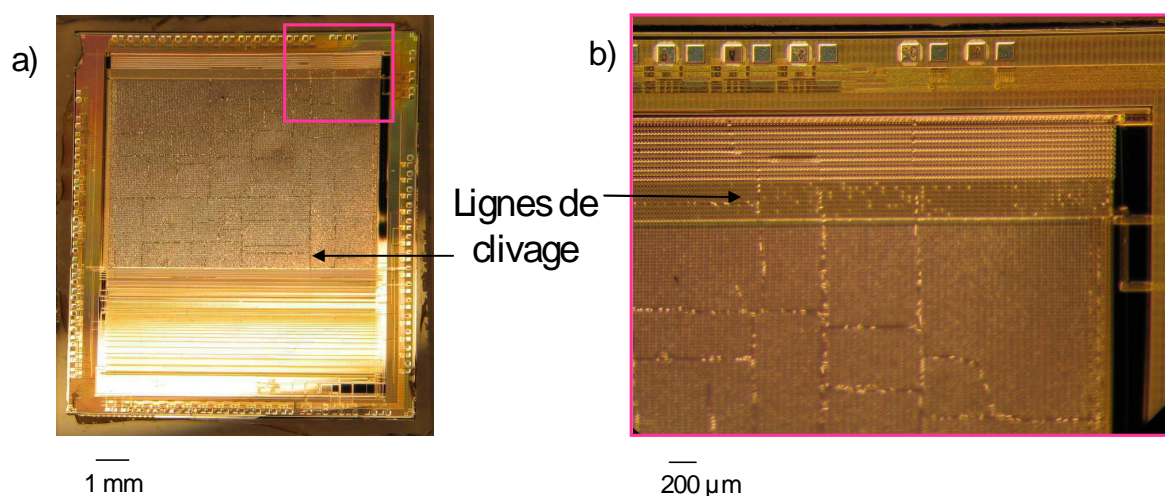


Figure C-49 : Lignes de clivage visibles sur la surface active
a) photo du bolomètre où les lignes de clivage apparaissent avec une réflexion différente ;
b) agrandissement au niveau d'une périphérie, les lignes se prolongent sur les plots d'interconnexion.

Compte tenu de la technique d'amincissement de ces détecteurs, des défauts cristallins sont générés dans le matériau et notamment des amorces de clivage peuvent apparaître en périphérie. La formation du plasma favorise la propagation des dislocations dans le Si-CMOS et provoque le clivage du circuit.

Nous avons défini une procédure de libération, consistant à réaliser des cycles courts et répétés, afin de diminuer la température tout en conservant la durée nécessaire à l'élimination du polymère sur tous les pixels.

Par la suite, les bolomètres sont câblés sur une céramique de routage, afin d'être caractérisés électriquement comme les composants standards.

C.III.3.2 - Etude électrique des bolomètres amincis

Les bolomètres amincis ont été caractérisés électriquement selon le procédé développé avec les circuits Si-CMOS amincis. Les mêmes problématiques de collage et câblage sont apparues. La photo de la Figure C-50 montre un bolomètre aminci et câblé sur la céramique. Le composant est collé par quatre bandes de résine qui rigidifient le composant au niveau des plots d'interconnexion.

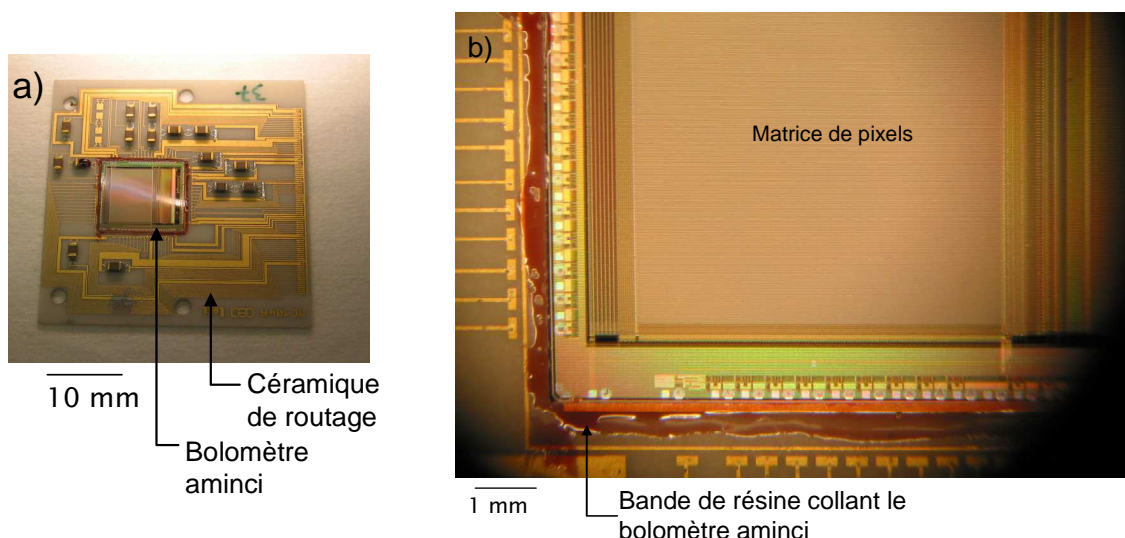


Figure C-50 : Câblage et collage des bolomètres amincis

a) Câblage sur la céramique de routage ; b) Agrandissement sur le collage en coin de matrice

Trois bolomètres amincis ont été testés électriquement. Etant donné que l'étape de libération n'est pas encore effectuée, le comportement des pixels ne peut donc pas être étudié. Les seules grandeurs quantifiables sont la tension et le bruit du niveau de recharge qui correspondent au comportement au repos du circuit CMOS. Ces valeurs sont comparées à celles d'un bolomètre standard du même lot pris comme référence.

Les paramètres de caractérisation sont la tension moyenne et la dispersion mesurées sur le niveau de recharge du composant (au repos). Les valeurs présentées dans le Tableau C-12 sont des écarts entre les valeurs de référence et celles mesurées sur le composant aminci. Elles sont exprimées en pourcentage pour les grandeurs moyennes et par une différence pour la dispersion (Tableau C-13).

MOYENNE	Tension de recharge	Bruit de recharge
Bolomètre a	0,3 %	- 8,6 %
Bolomètre b	1,1 %	0,7 %
Bolomètre c	0,1 %	0,4 %

Tableau C-12 : Mesures sur la tension moyenne et le bruit moyen

DISPERSION	Tension de recharge	Bruit de recharge
Bolomètre a	0,2 %	0,4 %
Bolomètre b	0,3 %	0,5 %
Bolomètre c	0 %	0,4 %

Tableau C-13 : Mesures sur la dispersion de la tension et la dispersion du bruit

L'écart des tensions moyennes entre le détecteur standard et aminci est très faible (inférieur à 1 %). La dispersion sur cette mesure est également minime (pratiquement nulle). Le bruit du détecteur aminci est très faible (1 %) ; seul un bolomètre présente un écart en bruit de 8,6 %. La dispersion mesurée sur ces circuits est négligeable.

Cette étude permet de confirmer les résultats obtenus sur le circuit Si-CMOS nu : l'étape d'amincissement ne dégrade pas le comportement électrique du circuit de lecture.

C.III.3.3 - Etude des bolomètres courbés

Après courbure, ces bolomètres sont câblés et montés dans une enceinte thermique sous vide (ETSV). La photo de la Figure C-51 illustre ce câblage et le routage des données électriques.

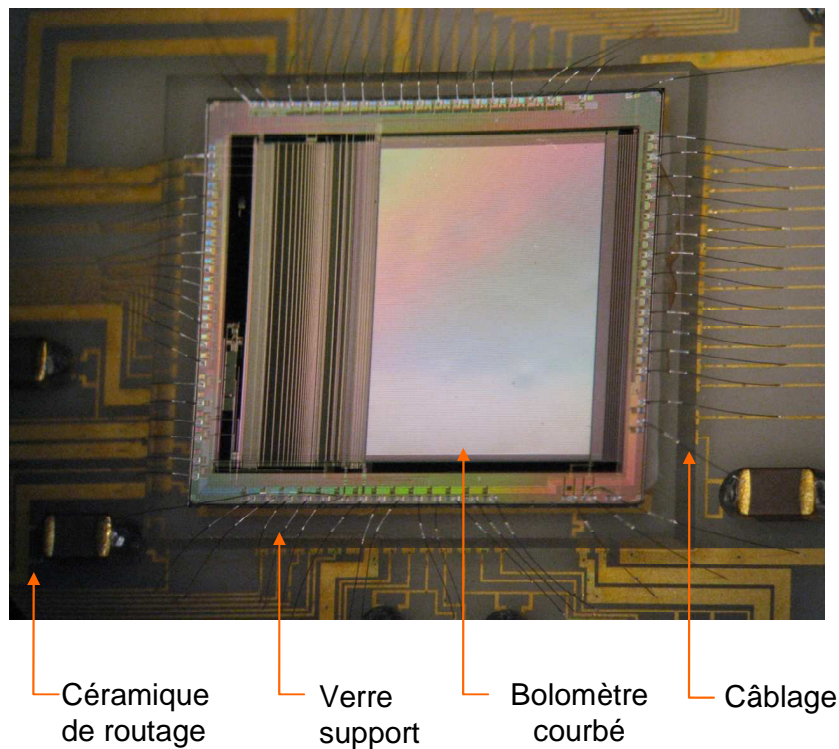


Figure C-51 : Bolomètre courbé

Dans cet environnement, le bolomètre peut être entièrement caractérisé.

Le comportement électrique de la matrice de détection est analysé sous deux régimes :

- le comportement au repos par la mesure du niveau de recharge. Cette caractérisation permet de comparer le comportement du circuit Si-CMOS du bolomètre par rapport à l'étude du circuit nu.

- le comportement du bolomètre en fonctionnement face à un corps noir. Dans cette configuration le bolomètre détecte le rayonnement infrarouge émis par le corps noir ; la réponse de la matrice sensible est convertie en une tension et un bruit moyen. La réponse est étudiée avec deux températures, 20 °C et 30 °C. Les mesures effectuées permettent de déterminer la réponse en tension du dispositif en V/K ; elle représente la sensibilité du capteur.

Deux bolomètres, courbés à 73 mm (n°4) et 80,6 mm (n°5) sont étudiés dans les tableaux suivants.

Niveau de recharge	Valeur moyenne		Dispersion	
	Tension	Bruit	Tension	Bruit
n°4	0,2 %	4,6 %	0,4 %	3,3 %
n°5	0,8 %	4,6 %	4,7 %	3,8 %

Tableau C-14 : Caractérisation du composant au repos : niveau de recharge

Niveau de référence Corps noir à 30°C	Valeur moyenne		Dispersion	
	Tension	Bruit	Tension	Bruit
n°4	5,8 %	2,7 %	- 4,2 %	0,03 %
n°5	3,3 %	4,1 %	- 3,6 %	- 1,6 %

Tableau C-15 : Caractérisation du composant en fonctionnement

C.III.3.3.1 - Comportement au repos

Le comportement au repos (Tableau C-14) montre un écart en tension inférieur à 1 % ; cette variation est inférieure à celle mesurée sur le circuit CMOS dans la partie précédente (5 %). Le bruit mesuré présente une variation maximale de 5 %, qui est un écart très acceptable sur ces mesures. L'écart en dispersion est également faible sur les mesures de tension moyenne et de bruit. L'écart en tension mesuré sur le bolomètre n°5 est plus important car il a une dispersion intrinsèque plus faible que celle du bolomètre de référence.

Ces résultats montrent que le circuit de lecture a un comportement similaire au bolomètre de référence.

C.III.3.3.2 - Comportement face à un corps noir

Le comportement électrique des bolomètres à un rayonnement infrarouge est présenté dans le Tableau C-15. Les tensions moyennes mesurées montrent un écart avec la référence inférieur à 6 %. Cet écart est plus important que celui mesuré sur le comportement au repos ; néanmoins, la dispersion reste faible et le bruit mesuré sur le bolomètre est inférieur à 5 %.

Les tensions moyennes sont un peu plus élevées après la courbure ; néanmoins cet écart correspond à un dixième de volt, ce qui est négligeable. Un point important est le niveau de bruit dont les écarts mesurés, sur le circuit non polarisé et en fonctionnement, sont faibles. Ces résultats démontrent que la courbure ne dégrade pas le fonctionnement électrique du circuit et les pixels sont fonctionnels.

C.III.3.3.3 - Réponse des bolomètres

Les caractérisations aux deux températures (20°C et 30°C), permettent de définir la réponse en tension du bolomètre (Tableau C-16). Les réponses de ces composants courbés sont très proches de la valeur de référence qui est égale à 6,2 mV/K ; l'écart avec les bolomètres courbés est de 0,8 % pour le n°4, et 2 % pour le n°5. L'écart accepté pour les réponses en tension des détecteurs infrarouge non refroidis est de 1,5 % dans l'industrie (ULIS 2011).

Le deuxième paramètre analysé dans l'industrie est le NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) qui est le rapport entre le bruit du circuit et la réponse en tension aux deux températures du corps noir. Sa valeur doit être inférieure à 60 mK. Dans le cas des bolomètres courbés, ce paramètre est proche de cette valeur. Ainsi, les résultats du bolomètre courbé sont conformes aux spécifications industrielles, notamment le n°4.

	Réponse en tension	NETD
n°4	6,252 mV/K	59 mK
n°5	6,337 mV/K	66 mK

Tableau C-16 : Réponse et NETD mesurés sur les bolomètres courbés

Bolomètre & courbure

Le procédé de courbure développé sur les échantillons de silicium et optimisé sur les circuits Si-CMOS, a été transféré aux détecteurs thermiques avec succès.

D'un point de vue technologique, l'amincissement et la mise en forme sphérique s'intègrent parfaitement à la suite du procédé de fabrication des pixels sensibles. La libération et l'intégration dans un ETSV sont menées de façon similaire sur les composants courbés et standards. Ainsi, les procédés de fabrication industriels ne sont pas remis en cause et l'industrialisation de la courbure pourrait être envisagée.

D'un point de vue électrique, le fonctionnement des détecteurs courbés est similaire au comportement d'un bolomètre standard, conformément aux spécifications industrielles. Ces détecteurs peuvent donc imager des scènes en infrarouge, objet du chapitre suivant.

Conclusion du troisième chapitre

Ce chapitre a été consacré à la mise en forme sphérique de circuits fonctionnels : circuit Si-CMOS et imageur infrarouge. Il existe plusieurs systèmes de détection du rayonnement infrarouge dont les deux filières principales sont :

- les détecteurs thermiques : les bolomètres,
- les détecteurs infrarouge refroidis en CdHgTe.

Ces deux détecteurs possèdent le même circuit de lecture Si-CMOS mais se différencient par la structure de détection. Le premier est entièrement constitué de silicium, le second est une structure hybride composée de silicium et du semi-conducteur ternaire CdHgTe.

Ces deux systèmes ont permis d'adresser les deux applications mises en évidence dans le chapitre A :

- les systèmes optiques inspirés des yeux d'insecte : réalisés par la structuration en îles de matériau du circuit de détection photovoltaïque,
- la correction des aberrations de courbure de champ : obtenue par la courbure concave pleine puce du bolomètre.

L'architecture hybride du détecteur refroidi se prête naturellement à la vision multi-pupillaire des insectes. Le circuit de détection a été structuré en groupes de pixels de 64x64 pixels interconnectés par des tranchées métallisées composées de 1, 2, 4 ou 8 oscillations. La conception et le test électrique de ce circuit sont des jalons importants que j'ai validés afin d'envisager, par la suite, la courbure de cette structure hybridée. Les résultats montrent un fonctionnement très satisfaisant et analogue à celui des circuits photovoltaïques de filière standard.

L'architecture monolithique des circuits Si-CMOS et des bolomètres permet leur courbure pleine puce. Ces circuits sont des composants sur étagère et ne sont donc pas modifiés pour la courbure. Le procédé de mise en forme est similaire à celui développé au cours de l'étude silicium. Le détecteur est aminci à 50 μm en unitaire et la surface est protégée par un film. Les étapes d'intégration (collage, câblage) sur la céramique sont standards ; l'étape de libération des bolomètres est adaptée pour diminuer l'échauffement du composant.

Les conclusions importantes de ce chapitre sont les suivantes :

Résultats de courbure

- la courbure convexe de détecteurs est obtenue avec des pliures en périphérie,
- la courbure concave est parfaitement sphérique.

Ces résultats sont identiques à l'étude menée sur les carrés de silicium ; néanmoins, les amplitudes des pliures en convexe et les écarts mesurés entre les rayons du détecteur et du support sont légèrement plus importants. La courbure avec le procédé optimisé lors de l'étude silicium (outil amélioré) peut améliorer le résultat de courbure sur les imageurs.

- le potentiel de courbure se définit selon deux critères : la limite mécanique (pas de clivage) et la limite électrique (fonctionnement électrique conservé)

J'ai ainsi pu définir les rayons accessibles pour chaque composant comme l'illustre la Figure C-52.

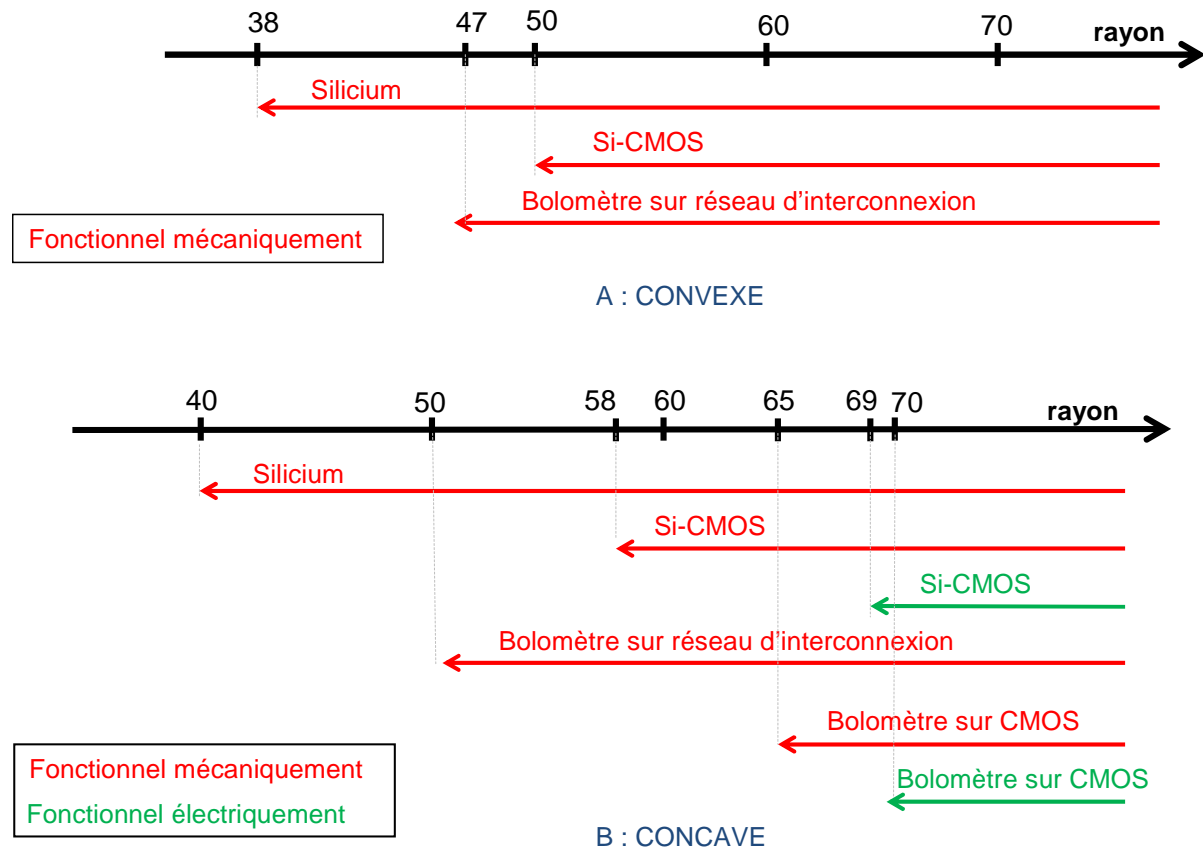


Figure C-52 : Rayons accessibles en convexe et en concave

Silicium : $10 \times 10 \text{ mm}^2$ - Si-CMOS : $11 \times 12,5 \text{ mm}^2$ - Bolomètre sur réseau d'interconnexion $10,5 \times 10 \text{ mm}^2$ - Bolomètre fonctionnel : $11 \times 12 \text{ mm}^2$

Les rayons minimums des échantillons de silicium et des bolomètres mécaniques sont des limites expérimentales. Les rayons critiques actuels des composants Si-CMOS et bolomètres fonctionnels sont obtenus avec le procédé de courbure actuel. Un amincissement collectif (avec déstressage) pourrait permettre de diminuer ces rayons critiques.

Comportement électrique

- ni l'amincissement, ni la courbure ne dégradent le comportement électrique des circuits Si-CMOS et des bolomètres.

Les caractérisations effectuées n'ont montré aucune dégradation, ni dans les grandeurs mesurées (tensions moyennes et bruit), ni sur la dispersion des valeurs sur la matrice. Les détecteurs sont similaires après courbure aux composants standards.

- les pixels bolométriques, malgré leur structure fragile, ne sont pas dégradés par la mise en forme sphérique. Les pixels ne sont donc pas un facteur limitant pour diminuer le rayon de courbure.

Ce chapitre s'est focalisé sur la courbure et l'analyse du comportement électrique des détecteurs. Le suivant se consacrera à la caractérisation électro-optique des bolomètres courbés. L'objectif est double : le premier consistera à étudier ces bolomètres dans leur mode imageur afin de valider le fonctionnement de ces nouveaux détecteurs ; le deuxième illustrera les avantages optiques de la courbure du plan focal.

CHAPITRE D : CARACTERISATIONS OPTIQUES DE BOLOMETRES

Introduction

Le fonctionnement des bolomètres courbés ayant été validé du point de vue mécanique et électrique dans le chapitre précédent, deux systèmes optiques les intégrant vont être réalisés. Leurs caractérisations électro-optiques vont permettre d'illustrer les avantages optiques du plan focal courbé. Le premier chapitre (A partie II) a montré les avantages théoriques ; la fonction de transfert de modulation (FTM) est de meilleur niveau et la réponse impulsionnelle est uniforme le long du champ. Ces mêmes caractérisations seront mises en évidence dans ce chapitre.

Cette étude sera réalisée avec deux montages, qui diffèrent par la complexité de leur architecture. Le premier est un système à deux lentilles sphériques du commerce (Figure D-1 a), qui permettra d'illustrer les gains optiques par comparaison avec l'architecture plane. Le deuxième est un système à une seule lentille asphérique. Ce montage s'inspire de l'œil humain et mettra en évidence la qualité optique obtenue grâce au plan focal courbé (Figure D-1 b) sur une architecture minimaliste.

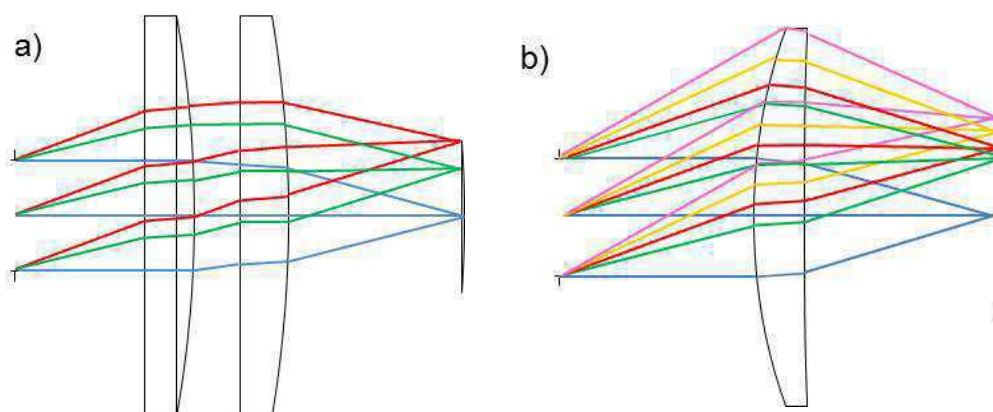


Figure D-1 : Montage réalisé avec le détecteur courbé : a) à deux lentilles ; b) à une seule lentille

Dans la première partie de ce chapitre, nous détaillerons les adaptations technologiques et mécaniques nécessaires pour réaliser ces montages optiques. Nous présenterons la mise au point du banc de mesure de la FTM qui a permis la caractérisation électro-optique des bolomètres courbés. La deuxième partie sera consacrée au système à deux lentilles, et la troisième partie décrira l'œil infrarouge réalisé.

D.I - Adaptation mécanique et technologique pour réaliser un système imageant

Les premières expériences d'imagerie ont été effectuées en avance de phase par rapport à la conception des systèmes que nous étudierons par la suite. Elles ont permis progressivement d'évaluer les modifications à apporter au détecteur courbé et de définir le mode d'intégration des optiques dans les deux systèmes réalisés.

D.I.1 - Premières images et adaptation technologique

Les premières images obtenues avec le bolomètre courbé ont été réalisées avec le système imageant traditionnellement utilisé au département. Ce système, constitué de trois lentilles de diamètre 2", a une ouverture importante, mais il n'est pas adapté à la configuration du détecteur courbé.

Ces expériences d'imagerie ont cependant permis de valider le fonctionnement du bolomètre par l'obtention d'une image infrarouge. Cette image constitue la confirmation de la viabilité de cette nouvelle technologie, et m'a permis de démontrer que toutes les fonctionnalités demandées au bolomètre courbé étaient respectées.

L'image obtenue, grâce à la rétine courbe, avec le système imageant des bolomètres plans est présentée à la Figure D-2 :



Figure D-2 : Première image obtenue avec le bolomètre courbé

On observe en bas à gauche de cette image, une zone présentant un fort grain et une perte de netteté due à un bruit plus important. La réponse de la matrice sensible n'est pas uniforme. L'analyse électrique de ce bolomètre courbé confirme ce résultat. On observe une inhomogénéité de réponse sur la matrice (Figure D-3 a). Dans le coin bas gauche, elle est quasiment nulle avec un bruit très élevé (image du NETD, Figure D-3 b) par comparaison avec le centre de la matrice.

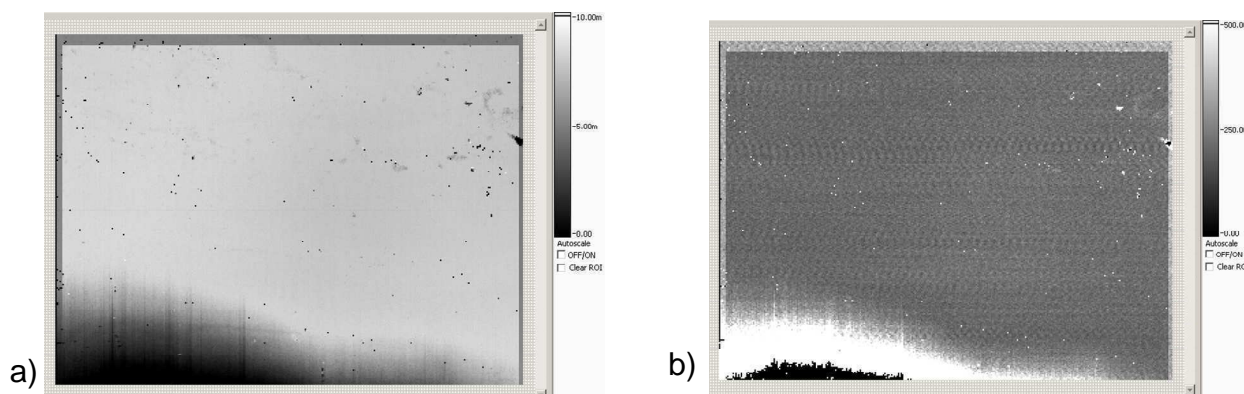


Figure D-3 : a) Réponse en tension du détecteur actif ; b) Image du NETD

Pour comprendre ce défaut, nous allons examiner plus précisément le câblage de ce bolomètre. Traditionnellement, les bolomètres sont fixés sur la céramique par un adhésif.

Le bolomètre est courbé sur un verre support qui est au contact de la céramique uniquement au centre de la courbure, les bords du support étant relevés (Figure D-4).

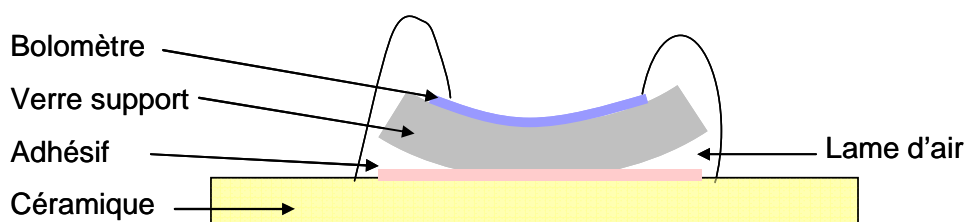


Figure D-4 : Schéma du bolomètre courbé câblé sur céramique

Ainsi, toute la surface n'est pas régulée thermiquement de la même manière ; la même difficulté apparaissait lors de l'étape de libération. Le bolomètre étant un détecteur thermique peu sensible, il est nécessaire de soigner les échanges thermiques entre le support et le bolomètre pour éviter des pertes et une baisse de la sensibilité de détection. Le plan focal est régulé en température par effet Peltier ; cette régulation se fait au travers de la céramique et du verre pour les détecteurs courbés.

Afin d'uniformiser la réponse du bolomètre, ce montage a donc été modifié afin de supprimer la lame d'air. L'espace a été comblé avec une colle conductrice thermique (résine époxy). Cette solution est présentée à la Figure D-5.

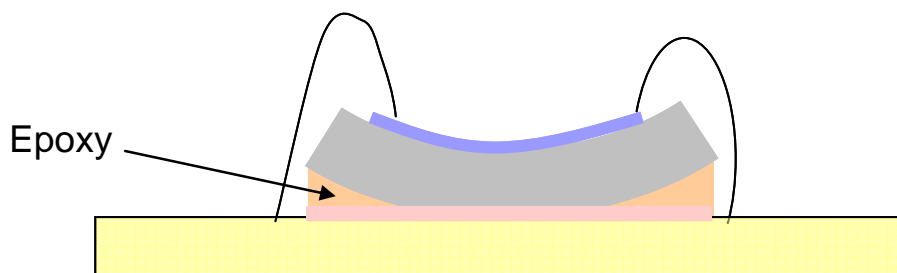


Figure D-5 : Câblage du bolomètre pour améliorer la surface d'échange thermique

Cette adaptation a permis d'obtenir une image de meilleure qualité, telle que l'illustre la photo de la Figure D-6 a. La réponse est plus uniforme, par comparaison avec la photo précédente, et les zones bruitées ne sont plus visibles. Bien que le système ne soit pas optimisé pour ce bolomètre, l'image est acceptable, les détails sont visibles mais les contours ne sont pas nets, ce qui est imputable à l'optique utilisée. La réponse du bolomètre est néanmoins sensible : on distingue l'empreinte de la main sur le carton.

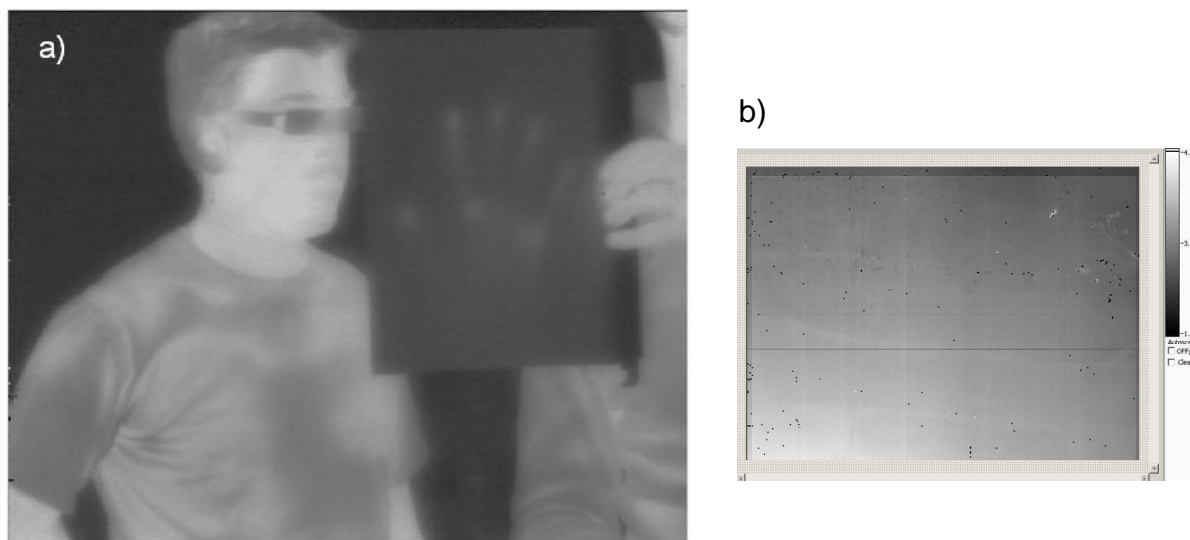


Figure D-6 : Après amélioration de la surface d'échange thermique : image (a) ; réponse électrique (b)

Après amélioration de la surface d'échange thermique, la cartographie des tensions moyennes de ce bolomètre confirme la qualité image obtenue. La zone bruitée a été supprimée (Figure D-6 b). Effectivement, après l'amélioration de la thermalisation, la quantité de bruit mesuré, au repos et lorsque le composant est actif, est divisé par 3. Les résultats électriques complets de ce composant sont présentés au chapitre C (partie III 3 - bolomètre n°4).

D.I.1.1 - Sélection d'un nouveau support

Dans la suite de mes travaux, j'ai remplacé les verres de montre par des lentilles plan-concave. Ces supports ont l'avantage de présenter une surface courbée et une surface plane (Figure D-7), et par conséquent l'échange thermique sera facilité par l'interface plan / plan

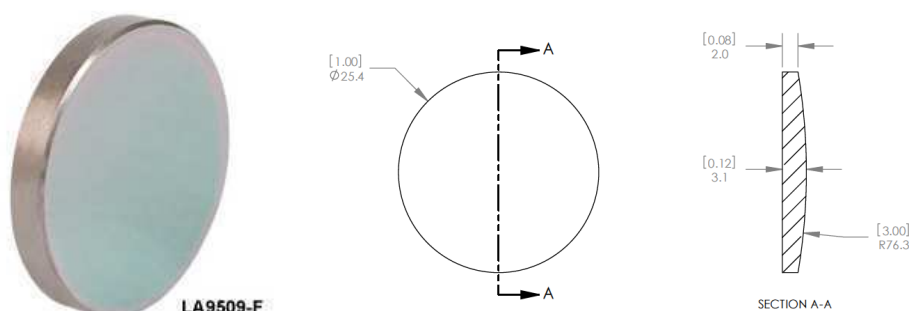


Figure D-7 : Photos et schéma des lentilles plan concave utilisées

De plus, ces éléments optiques présentent un meilleur contrôle du rayon de courbure que les verres de montre, et le deuxième chapitre a montré l'importance de la qualité du support sur les résultats de courbure. Etant donné que le composant courbé reproduit la surface du support, celle-ci doit être la plus homogène et sphérique possible (chapitre B, partie II).

Ainsi, les lentilles répondent aux deux problématiques (surface d'échange thermique, résultat de courbure) et permettront l'obtention d'images infrarouge dans de meilleure configuration.

D.I.1.2 - Alignement de l'axe optique

L'axe optique de tous les systèmes avec détecteur courbé coïncide avec le centre de courbure. Il doit donc correspondre au centre de la matrice de détection. Or, dans le cas du bolomètre courbé sur le verre de montre, nous constatons que la matrice est décentrée par rapport à l'axe optique perpendiculaire à la céramique (Figure D-8). Le simple décalage et l'inclinaison de l'ensemble n'est pas possible étant donné les faibles dimensions mécaniques et la précision nécessaire. Ce paragraphe va décrire ce point technologique, les solutions envisagées et l'adaptation technologique qui a été choisie.

Ce résultat était prévisible du fait que la matrice de pixels sensibles est décalée sur le haut du capteur, et que le procédé de courbure a été développé de telle sorte que le centre du capteur et le centre de courbure correspondent. Cet écart est certes faible, mais peut dégrader les résultats obtenus.

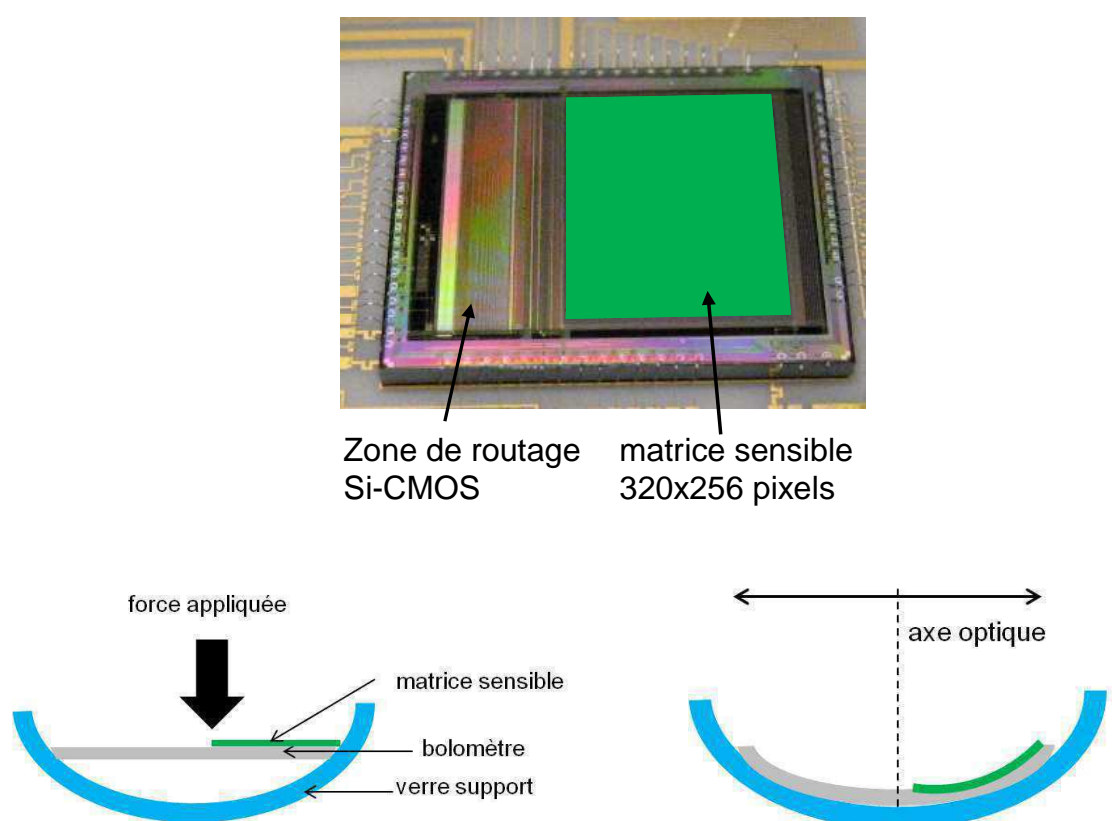


Figure D-8 : Schéma de la matrice décentrée
En vert la matrice de pixels, en gris le bolomètre et en bleu le support

Dans le cas de la courbure du silicium ou du Si-CMOS, j'ai recherché cette symétrie de mise en forme sphérique pour plusieurs raisons. En effet, il est plus aisé d'appliquer la force lorsque l'outil de courbure est aligné avec le détecteur et la concavité du support. Le deuxième chapitre a effectivement démontré l'influence du procédé (outils, alignement) sur la qualité de la surface sphérique obtenue. De plus, elle permet une symétrie du comportement mécanique du silicium.

L'écart entre le centre de courbure du bolomètre et le milieu de la matrice est illustré sur les Figure D-9. Ces surfaces sont issues des caractérisations faites par profilométrie optique. La zone noire, se trouvant à l'altitude la plus basse, correspond au centre de courbure. La Figure D-9 b présente la surface du bolomètre où la matrice sensible est visible. La superposition de ces deux surfaces permet de déterminer la position du centre de la courbure par rapport à la matrice.

Un bolomètre a une surface de $12,2 \times 10,7 \text{ mm}^2$, et la matrice de détection est placée à une distance de 1,5 mm et 1,3 mm de la périphérie (Figure D-9 a). Or, le centre de courbure est situé à $194 \text{ }\mu\text{m}$ du bas de la matrice.

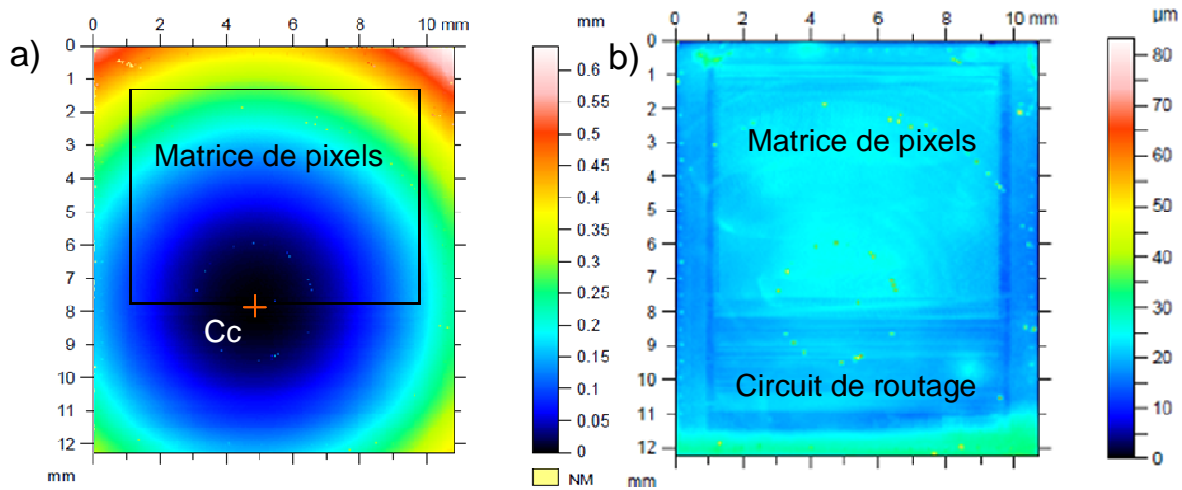


Figure D-9 : Position du centre de courbure en comparaison de la matrice de pixels

La Figure D-10 positionne ces deux centres notés C_m pour le centre de la matrice sensible, C_c le centre de courbure. Afin de faire coïncider les deux centres, il faut donc déplacer le centre de courbure (C_c) d'une distance de $489 \text{ }\mu\text{m}$ selon l'axe x et $3,3 \text{ mm}$ en y mais il faut également faire une rotation de la matrice, afin que l'axe optique (c'est-à-dire l'axe z) soit perpendiculaire à la matrice. Cette rotation est estimée à -2° en x et 13° en y (Figure D-10 b).

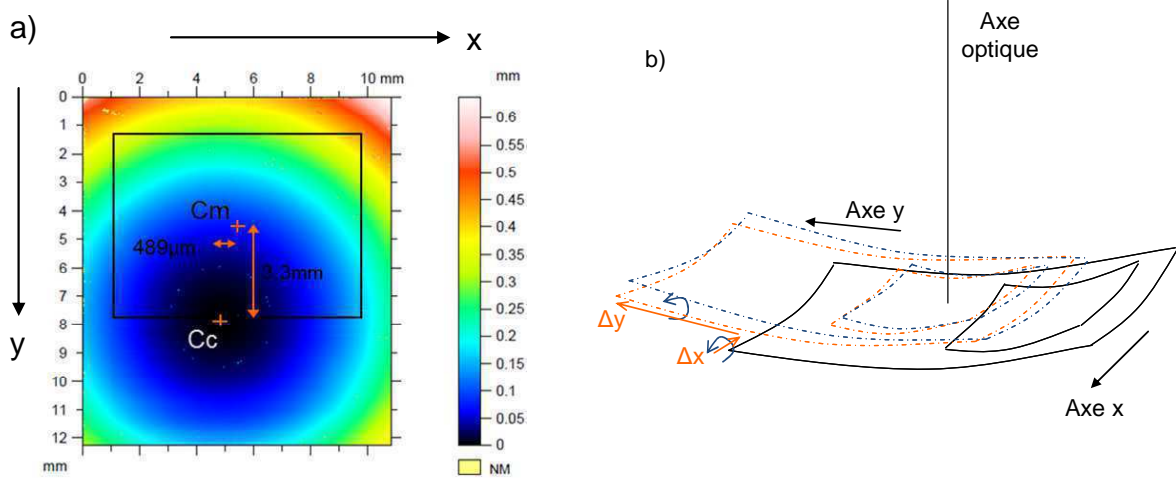


Figure D-10 : Position des deux centres Cc et Cm

Décalage en x et y (matrice orange) puis rotation (matrice bleue) pour faire coïncider l'axe optique (centre de la matrice de pixels sensibles) avec le centre de courbure

Plusieurs solutions peuvent être envisagées. La première consiste à recoller le bolomètre sur une nouvelle surface mieux adaptée. Cependant, l'époxy utilisé n'étant pas soluble, il est impossible de démonter le bolomètre. D'autre part, le composant est trop fragile pour être décâblé, décollé et courbé une nouvelle fois. D'autres solutions consistent à décaler et incliner le support ; cependant les angles nécessaires sont importants et difficile à réaliser avec la précision du positionnement de l'axe optique (tolérance de $\pm 1^\circ$).

Par contre, il existe une solution alternative qui consiste à placer l'axe optique sur la matrice de pixels sensible sans atteindre le centre. Ainsi, le déplacement est plus faible, et ne représente que $194 \mu\text{m}$; la rotation nécessaire pour aligner perpendiculairement l'axe optique avec la matrice de pixels sensible est de $0,8^\circ$, ce qui est inférieur au degré de tolérance. Cet écart induit donc une modification du montage optique. Dans le cas du système à deux lentilles, les optiques s'éloignent de $350 \mu\text{m}$ par rapport au plan focal. Cet écart est dans la tolérance du système que je vais détailler ici.

L'écart de positionnement des lentilles noté Δe , crée une incertitude de la distance focale $\Delta f'$ d'après la relation des distances focales d'un système à deux lentilles (Équation D-1).

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{e}{f'_1 f'_2}$$

Équation D-1 : Distance focale

Où f' est la longueur focale du système et f'_1, f'_2 les longueurs focales des lentilles 1 et 2 et e la distance qui les sépare.

L'incertitude sur la distance focale modifie la taille de l'image ainsi que la position du plan de focalisation. L'application numérique permet de déterminer l'incertitude de l'écart entre les deux lentilles Δe , qui ne modifie pas la qualité optique ou qu'il est possible de retrouver par un ajustement de la position du détecteur. Considérant la plus grande image détectable sur le capteur, l'écart de positionnement, qui introduit une variation de la taille de l'image inférieure à la taille d'un pixel (pas de $25 \mu\text{m}$), est donné à l'Équation D-2.

$$\Delta e = \frac{f'_1 f'_2 \Delta y'}{f' y'} \approx 0,4 \text{ mm}$$

Équation D-2 : Incertitude de position des deux lentilles (distance focale 13,8 mm)

Ainsi, l'écart de positionnement des lentilles (350 μm) pour décaler le plan focal de 194 μm , est inférieur à cette tolérance. Avec cette solution, l'axe optique est placé dans la partie inférieure de la matrice sensible, comme l'illustre la Figure D-11.

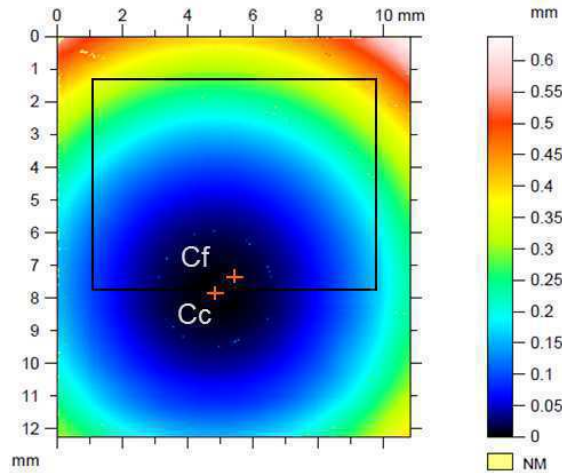


Figure D-11 : Décalage effectué pour placer l'axe optique au bas de la matrice

Afin de faire coïncider le centre de focalisation C_f avec le centre de courbure C_c , la céramique doit être décalée d'une distance de 500 μm selon l'axe x et de 194 μm en y. Ce montage expérimental a permis d'obtenir de bons résultats et de mettre au point la technique de mesure FTM. Néanmoins, cette solution n'est pas acceptable pour les caractérisations optiques et la suite de ces travaux.

D.I.1.3 - Supports décentrés

Pour pallier à ce problème d'alignement, le procédé de courbure a été modifié pour prendre en compte ce décalage de l'axe optique lors de la mise en forme sphérique. J'ai ainsi travaillé sur des supports préalablement inclinés, de telle sorte que le centre de courbure soit déplacé pour correspondre au centre de la matrice (Figure D-12).

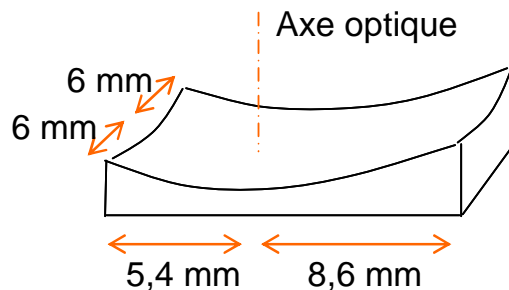


Figure D-12 : Schéma du support incliné

Ces travaux ont été réalisés sur les lentilles optiques qui sont les nouveaux supports plus adaptés que les verres de montre à la courbure (rayon constant sur toute la surface, meilleur

échange thermique). Une préparation particulière a été nécessaire ; en effet, elles sont trop épaisses pour être découpées avec la même technique que les verres de montre. Dans un premier temps, il a donc fallu les découper à la scie à fil pour former neuf morceaux : un carré central de 15x15 mm² et huit rectangles dont l'épaisseur varie du centre de la lentille à la périphérie. Les supports inclinés vont être créés à partir de ces rectangles périphériques (Figure D-13).

La première étape consiste à amincir les lentilles jusqu'à obtenir une épaisseur de 1,4 mm dans la partie centrale, ce qui permet de positionner le composant à la distance nécessaire pour le montage optique et faciliter son intégration dans l'ETSV (environnement de laboratoire : Enceinte Thermique Sous Vide), que je détaillerai dans la partie suivante. Le support peut ensuite être découpé comme les verres de montre ; cependant, la découpe est asymétrique dans le sens y et symétrique selon l'axe x (centre à 6 mm du bord) (Figure D-12).

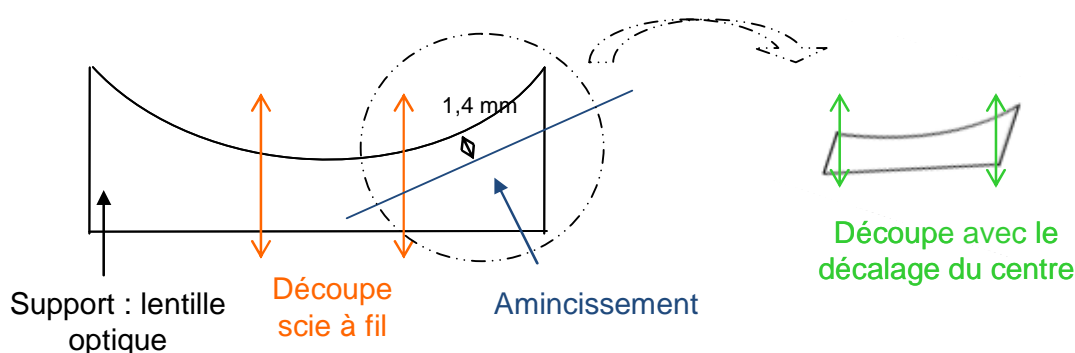


Figure D-13 : Etapes de la découpe de la lentille optique pour former un support dont le centre est décalé

Le bolomètre n°5 a profité de ces améliorations, et il est utilisé comme véhicule de test dans les deux systèmes décrits dans les parties suivantes. La Figure D-14 présente ce composant.

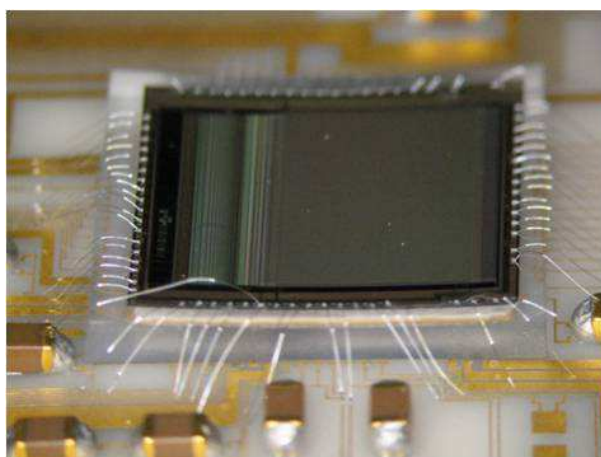


Figure D-14 : Photo du bolomètre n°5 câblé sur le support décentré

D.I.2 - Ingénierie des systèmes optiques

Les bolomètres sont intégrés dans une enceinte thermique sous vide, qui est présentée dans la figure ci-dessous (Figure D-15). Cette enceinte permet de contrôler l'environnement et d'atteindre une pression de quelques 10^{-6} mbar.

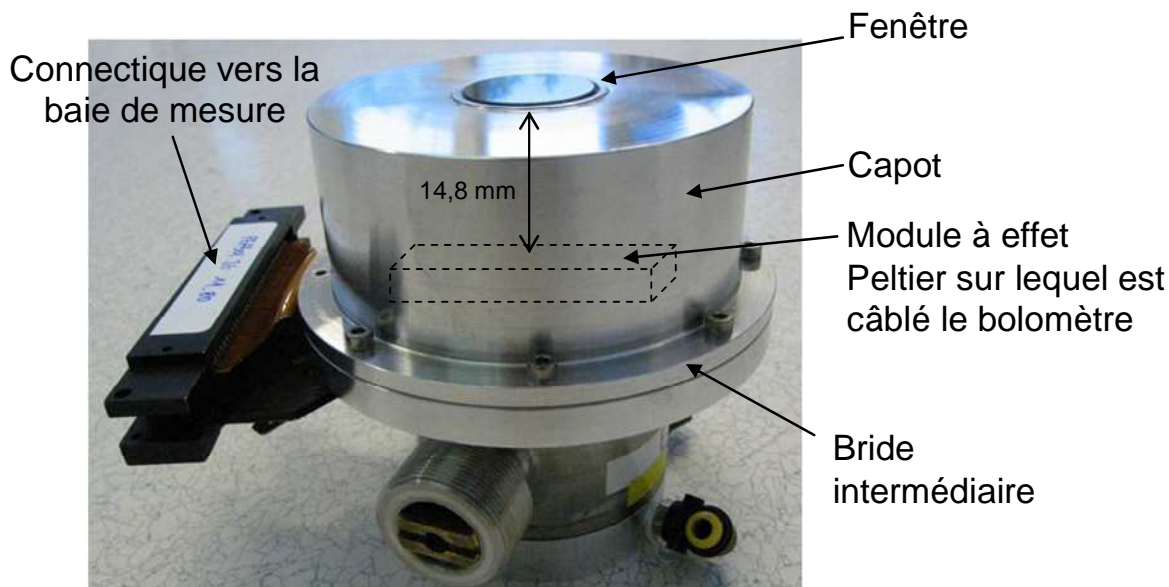


Figure D-15 : Enceinte thermique sous vide (ETSV) standard

Le détecteur est câblé sur la céramique et l'ensemble est reporté sur le module à effet Peltier par l'intermédiaire d'une feuille d'indium qui améliore la conduction thermique.

D.I.2.1 - Systèmes d'études de la thèse

Les architectures optiques d'étude sont constituées d'une à deux lentilles et d'un diaphragme, qui fixe l'ouverture. Ces montages sont optimisés par le logiciel Zemax ; les tableaux issus de ces simulations fournissent les positions des éléments les uns par rapport aux autres. La Figure D-16 correspond au système à doublet de lentilles.

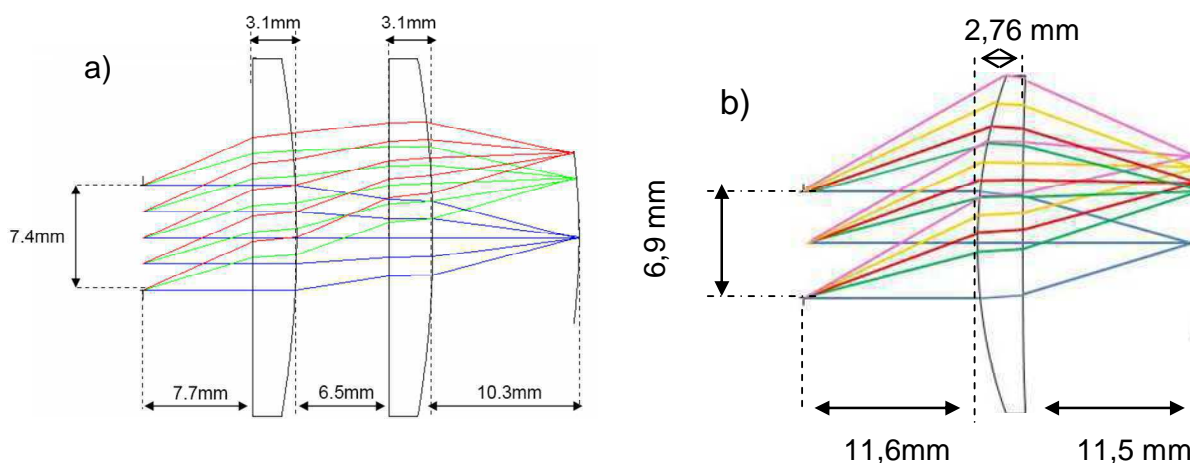


Figure D-16 : Montage optique a) à deux lentilles et b) une lentille – Objet placé à l'infini

Les systèmes ont une dimension totale de 30,7 mm (deux lentilles) et 20,9 mm (une lentille). La première lentille du doublet est placée à 10,3 mm de la rétine ; la lentille de l'œil infrarouge est localisée à 6,4 mm. Ces systèmes optiques sont donc miniatures. Etant donné que la hauteur typique entre la céramique et la fenêtre de l'ETSV standard est de 14,8 mm, une partie du bloc optique devrait être placée dans cette enceinte.

Afin de conserver l'environnement de laboratoire standard des composants, j'ai fabriqué un capot dont la hauteur est diminuée (capot dit abaissé) afin de positionner tout le système optique en dehors de l'ETSV, ce qui permet de régler la position des différents éléments et de faciliter la mise au point. La fenêtre du capot fait donc partie du système optique (Figure D-17) ; elle est en germanium, traitée antireflet avec deux faces parallèles. Elle est transparente aux infrarouges et ne modifie pas la qualité optique du système.

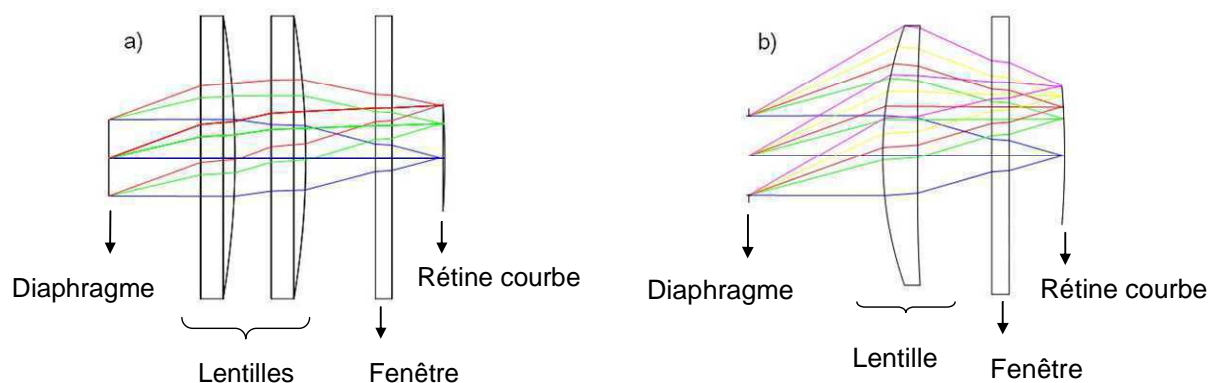


Figure D-17 : Schéma optique avec fenêtre a) doublet de lentilles ; b) œil infrarouge

La Figure D-18 présente le plan de l'ETSV réalisé. Le capot a une hauteur de 29 mm et la distance entre le plan du module à effet Peltier et la fenêtre est alors de 7,65 mm (soit une division par deux par rapport au standard).

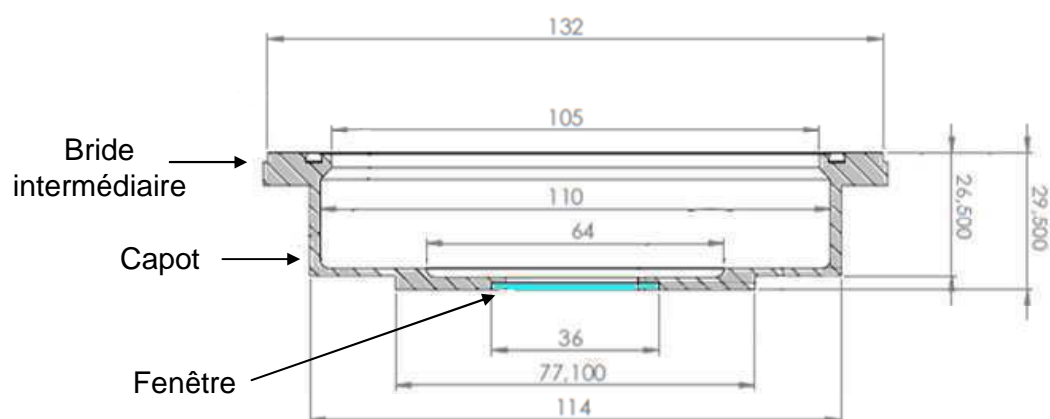


Figure D-18 : Plan de l'enceinte thermique sous vide

L'intégration des détecteurs dans l'ETSV (Figure D-19) est réalisée selon le procédé standard. Seule l'épaisseur différente de support doit être prise en compte.

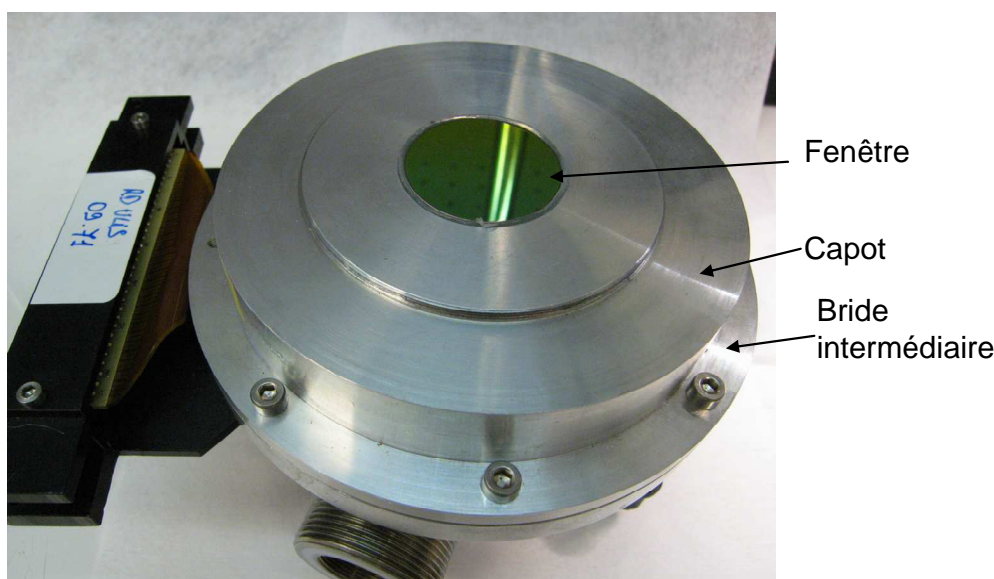


Figure D-19 : ETSV avec le capot abaissé

D.I.2.2 - Intégration des éléments optiques

J'ai également développé un système mécanique permettant de positionner les lentilles aux distances adéquates. Étant donné que ces montages sont expérimentaux, l'assemblage et le réglage doivent être simples et permettre un ajustement fin pour obtenir la netteté de l'image sur le plan focal. Mon choix s'est porté sur une intégration des lentilles dans un tube fileté de chez Thorlabs. Leur position est réglée grâce à un faisceau autocollimateur et maintenues entre deux anneaux vissés dans le tube.

Le diaphragme des systèmes a été réalisé afin d'être également monté dans ces tubes. J'ai choisi de le fabriquer à partir d'un élément Thorlabs (bouchon présenté à la Figure D-20 a), qui se visse dans les tubes. L'usinage de ce disque avec l'ouverture nécessaire est optimisé par une reprise d'usinage des flancs en marche d'escalier. L'épaisseur étant trop importante, cette structure permet d'éviter les réflexions parasites des bords (Figure D-20 b).

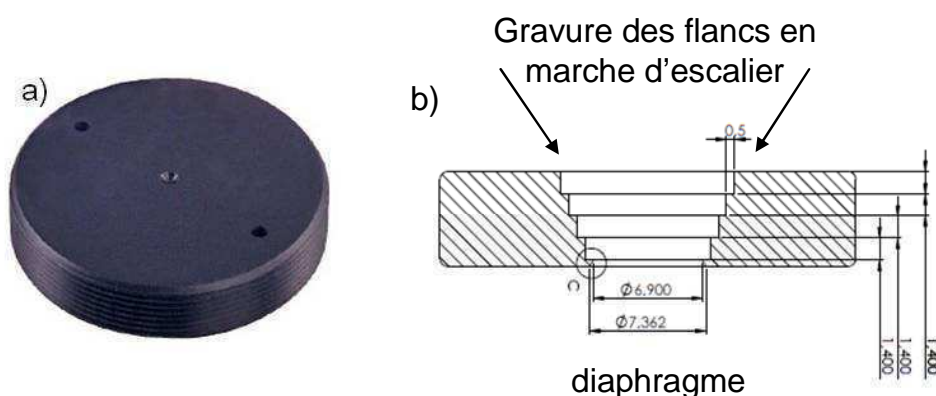


Figure D-20 : a) Bouchon d'optique Thorlabs ; b) Usinage du diaphragme en marche d'escalier

Ces deux systèmes optiques peuvent être montés dans un seul tube . En effet, d'après l'étude, la tolérance de positionnement des lentilles est de 0,5 mm ce qui est inférieur à l'incertitude de réglage avec l'autocollimateur (une dizaine de microns).

Les tubes ayant un diamètre de 1" et le capot un diamètre de 3", le passage de l'un à l'autre est réalisé par un adaptateur qui se visse entre avec ces deux éléments ; le capot, présente une zone filetée dans sa partie haute. Le réglage optique est obtenu par le déplacement de, adaptateur 3"-1" par rapport au capot (Figure D-21 a).

J'ai choisi de laisser une course de réglage minimale de 0,5 mm dans la direction du détecteur, et maximale de 1 mm en s'éloignant. Théoriquement elle aurait pu être rallongée ; néanmoins, lorsque l'adaptateur s'écarte du capot, le maintien par son filetage n'est pas correctement assuré Figure D-21 b.

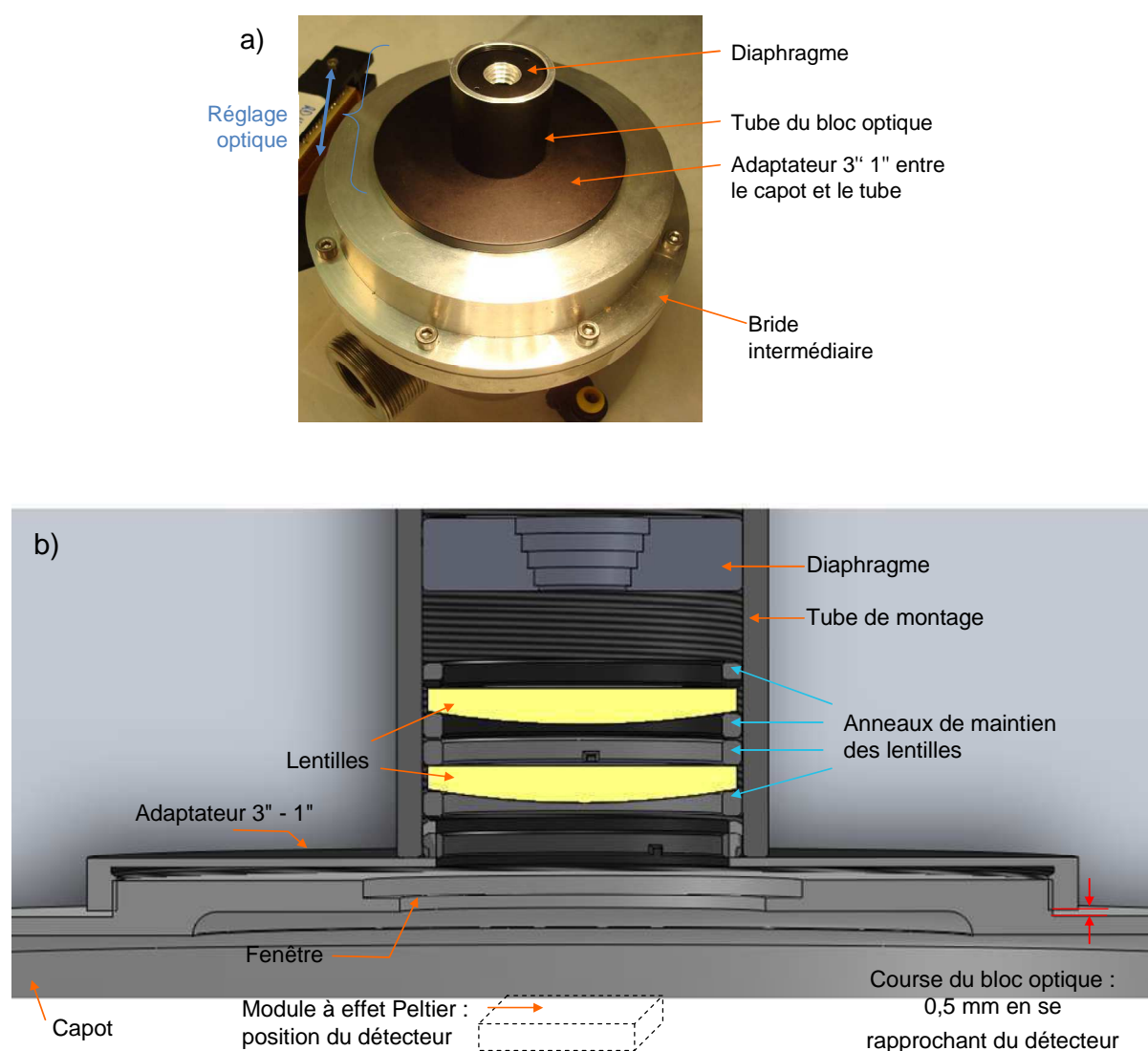


Figure D-21 : Montage du bloc optique sur l'ETSV a) photo de l'ensemble ; b) plan de montage, exemple du système à deux lentilles

D.I.3 - Mise au point de la mesure FTM

Les systèmes à une ou deux lentilles vont être analysés par la mesure de la fonction de transfert de modulation (FTM), afin de mettre en évidence l'avantage optique de la courbure de détecteurs. La FTM détermine la performance en qualité image d'un système optique en évaluant la perte de contraste associée à l'observation de mires périodiques de pas de plus en plus fins.

D.I.3.1 - Techniques de mesure

La technique de référence AFNOR (ISO 15529 2010) consiste à imager un bord de plage c'est-à-dire un bord incliné sur plusieurs pixels. Cette méthode a été développée au sein du département par Baptiste Cloix. Ses travaux, effectués au cours d'un DRT, sont principalement dédiés à la mesure de FTM sur les capteurs infrarouge refroidis. Son banc n'a pas pu être utilisé tel quel pour les expériences avec les bolomètres. En effet, contrairement aux systèmes refroidis, ceux développés pour les bolomètres courbés sont imageants à l'infini. L'adaptation de cette expérience nécessite un faisceau collimaté de grande taille et un bord de plage de plus d'un mètre pour couvrir toute la surface sensible. Une deuxième méthode a donc été appliquée.

La technique consiste à imager des mires ou plus exactement des fentes de pas décroissant. Ce sont des plaques en métal percées de fentes régulièrement espacées, dont la température est maintenue à la température ambiante par une circulation d'eau, et qui permet de masquer un corps noir étendu chaud. La lumière ne peut passer qu'au travers des fentes. Ainsi, on crée une alternance de bandes noires et blanches par une différence thermique entre les fentes (ouvertes, donc chaudes), et les espaces entre fentes (le métal froid).

Une mire à pas fixé représente un signal créneau qui est normalisé à un, lorsque la lumière traverse, et à zéro pour les barres noires. L'image de cette mire donnée par le système optique est déformée par les aberrations du système. Le signal créneau est alors déformé en une sinusoïde avec des flancs plus ou moins inclinés et une baisse d'amplitude. Si l'échelon est bien résolu, la sinusoïde a l'amplitude du créneau et des flancs légèrement inclinés ; au contraire s'il est de mauvaise qualité, la sinusoïde est très affaiblie et les flancs sont complètement sinusoïdaux.

Cette alternance au pas variable permet de caractériser le contraste à une fréquence spatiale (amplitude A_v) connaissant les valeurs maximale et minimale (amplitude A_0). Ces niveaux de référence sont mesurés par le fond chaud (observation du corps noir seul) et une plaque de métal (donc complètement froide). Ces références permettent de calibrer la réponse du bolomètre et avoir ainsi une normalisation de la réponse pour chaque position.

Le rapport A_v / A_0 donne la valeur de la FTC à la fréquence v . Sur la Figure D-22 l'échelon de tension est représenté par la courbe rouge, et la réponse du système par la sinusoïde bleue.

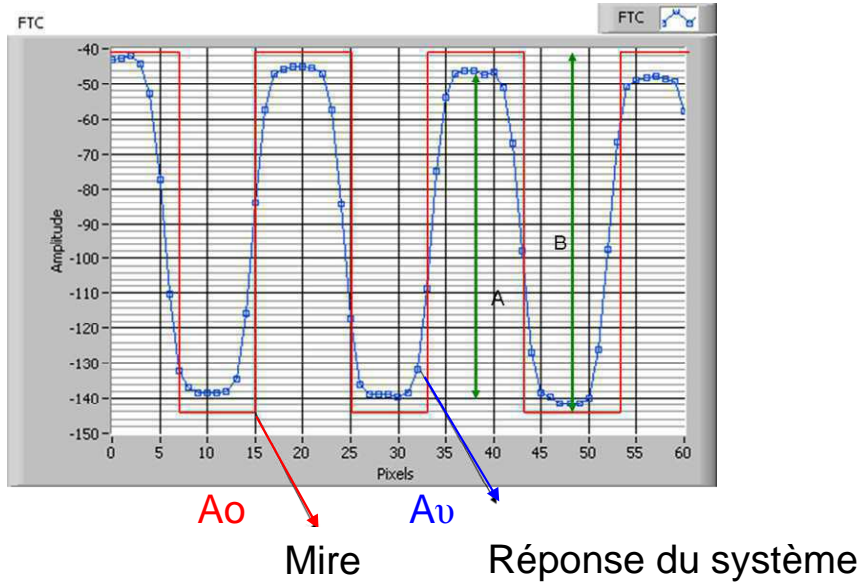


Figure D-22 : Graphe représentant l'échelon de tension (en rouge) et la réponse du système (en bleu) en fonction du nombre de pixels

La perte d'intensité est caractérisée par la mesure de la modulation qui représente donc le contraste de l'image de la fente à un pas fixé (Équation D-3).

$$Modulation = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Équation D-3 : Modulation d'intensité

Lorsque le pas diminue, c'est-à-dire lorsque la fréquence ν de la mire est élevée, les fentes seront progressivement moins résolues par le système. On obtient ainsi la fonction de transfert de contraste.

La fonction de transfert de modulation (FTM) peut être calculée à partir de cette fonction de contraste (FTC) par la relation :

$$FTM(\nu) = \frac{\pi}{4} \left(FTC(\nu) + \frac{FTC(3\nu)}{3} - \frac{FTC(5\nu)}{5} + \dots \right)$$

Équation D-4 : Fonction de Transfert de Modulation

D.I.3.2 - Montage expérimental

L'expérience consiste à imager des mires puis à calculer, à partir de ces images, la fonction de transfert de contraste (FTC). Le schéma ci-dessous illustre le montage qui doit être effectué (Figure D-23).

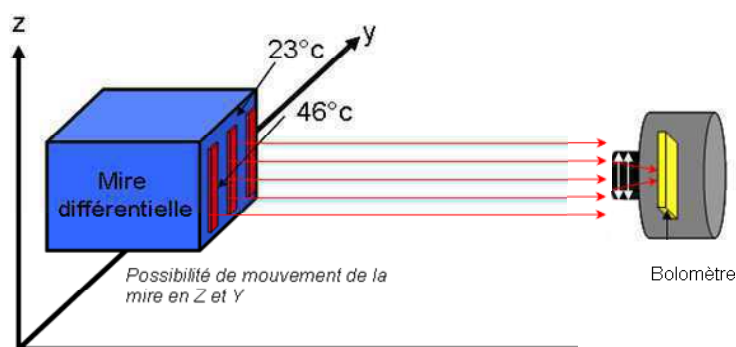


Figure D-23 : Montage expérimental réalisé

Pour l'expérience, j'utilise deux mires avec cinq pas variables, dont les valeurs sont : 12 mm, 6 mm, 4 mm, 3 mm et 2 mm comme le montre la Figure D-24.

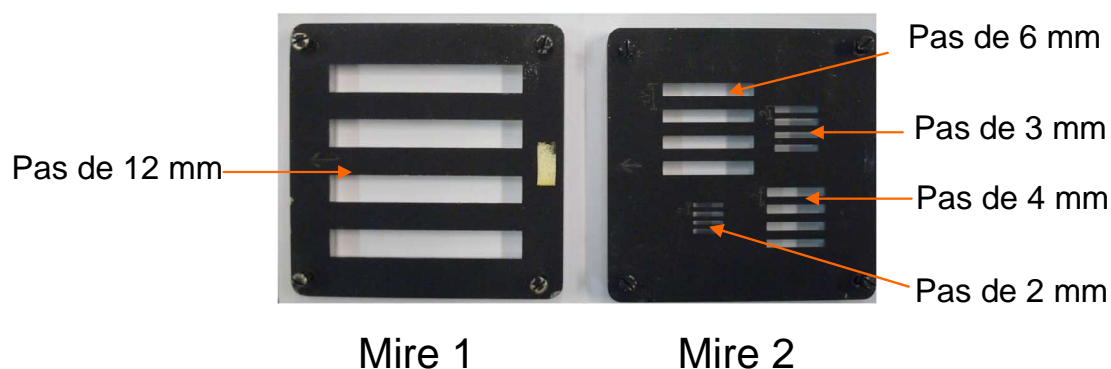


Figure D-24 : Photo des mires

Un objet de dimension OA placé théoriquement à l'infini (grande distance CO avec C le centre optique) s'image sur le plan focal avec une hauteur $O'A'$. Par la relation de Thalès, on obtient l'équation suivante (Équation D-5).

$$\frac{O'A'}{OA} = \frac{CO'}{CO} \text{ d'où } O'A' = \frac{OA \cdot CO'}{CO} = \text{focale} \cdot \frac{\text{taille objet } OA}{\text{distance objet } CO}$$

Équation D-5 : Taille de l'image sur le plan focal

Les mires sur le plan focal donnent les fréquences spatiales du système ; ces valeurs sont résumées dans le Tableau D-1.

	Mire 1	Mire 2			
Largeur de la fente dans l'espace objet (mm)	12	6	4	3	2
Largeur de la fente dans l'espace image (μm)	97	48	32	24	16
Fréquence spatiale (cycles / mm)	5	10	15	20	30

Tableau D-1 : Dimensions des mires utilisées

La limite théorique d'échantillonnage du système est donnée par la fréquence spatiale de Nyquist qui est obtenue par l'Équation D-6 :

$$v = \frac{1}{2.pas \text{ pixel}} = \frac{1}{2.0,025} = 20 \text{ cycles / mm}$$

Équation D-6 : Limite théorique d'échantillonnage

L'examen du graphique montre que la mire 2 avec une fente de 3 mm correspond à la fréquence de Nyquist. La mire au pas de 2 mm ne sera pas résolue et ne sera donc pas étudiée.

Etant donné que les systèmes d'étude sont imageants à l'infini, les mires doivent être placées à l'infini. Pour s'approcher de ces conditions, les mires sont placées à 1,70 m, qui est la longueur maximale accessible sur le banc.

De plus, étant donné que les avantages de la courbure du bolomètre apparaissent principalement hors axe, il est nécessaire de balayer la surface du détecteur lors des caractérisations. Le champ maximal du bolomètre étant de 40°, les mires doivent donc être imagées sur la périphérie de la matrice de détection. Soit le détecteur est déplacé de 3 mm par rapport au centre, soit les mires sont décalées de 20 cm par rapport à l'ETSV dans sa position initiale. Le choix s'est porté sur le déplacement de la mire. En effet, l'ETSV étant connectée à toute une baie de mesure, il est difficile de la déplacer.

L'expérience a donc été montée sur un marbre suffisamment grand, pour avoir la distance à « l'infini » nécessaire entre le détecteur et la mire. Et nous avons installé, en bout de ce marbre, un axe de translation afin d'accéder au champ maximum. Le montage final est présenté dans la Figure D-25.

L'ETSV est également montée sur une colonne réglable avec de faibles amplitudes dans les axes horizontal et vertical, afin d'aligner le détecteur avec les mires. De plus, lors des expériences, elle permettra l'ajustement des fréquences d'échantillonnage par rapport au pas pixel du détecteur. L'alignement du plan focal avec les mires (position de l'axe optique) est réalisé à l'aide d'un pointeur laser. Le laser remplace l'ETSV, le faisceau lumineux illustre le centre du détecteur et frappe la mire en un point qui doit correspondre au centre de la mire. Le réglage approximatif est effectué en positionnant la mire sur le bras horizontal au marbre et un alignement plus fin est réalisé par la colonne de l'ETSV.

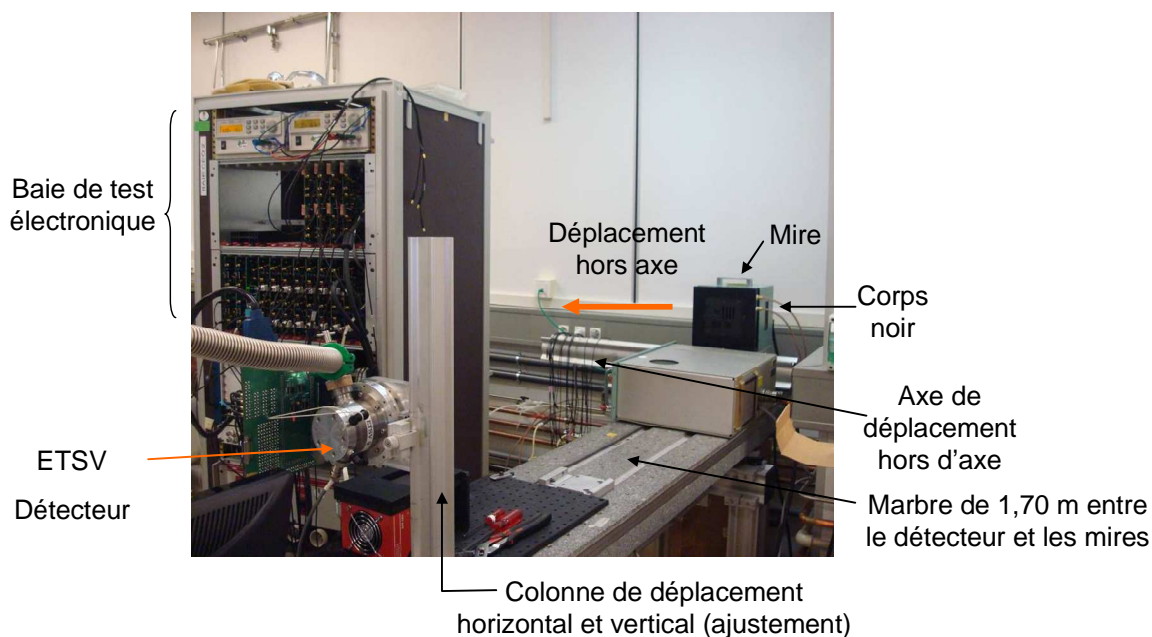


Figure D-25 : Montage du banc optique FTM

Mise en place des caractérisations électro-optiques

La première expérience d'imagerie a permis de faire l'adaptation des équipements de caractérisation et a mis en évidence des évolutions technologiques pour caractériser les bolomètres. La procédure de courbure a dû être modifiée pour placer l'axe optique sur la matrice de pixels (supports inclinés) et pour améliorer la conduction thermique de ces nouveaux détecteurs, afin d'augmenter le rapport signal sur bruit (utilisation de lentilles plan concave comme support). Dans un deuxième temps, l'ETSV a dû être adaptée à ma problématique. Le capot a été abaissé pour placer tout le système optique à l'extérieur.

Les images décrites dans ce paragraphe, n'étaient pas optimales (système optique standard). Avec les adaptations technologiques et les montages mécaniques prévus, les propres systèmes de la thèse ont été réalisés afin de mettre en évidence le gain de la courbure du plan focal par les mesures de franges de contraste (FTC). La première architecture est composée de deux lentilles. Cette caméra simplifiée va permettre l'analyse électro-optique du bolomètre courbé et la comparaison avec un système plan. Le deuxième système est minimaliste et forme un œil infrarouge.

D.II - Système à deux lentilles

Le premier chapitre a mis en évidence les gains optiques des plans focaux courbés. La courbure permet de simplifier le système, qui gagne également en qualité optique par rapport aux systèmes traditionnellement plans. Dans notre cas, le gain optique peut être défini comme l'obtention d'une meilleure uniformité de réponse impulsionnelle. L'avantage en termes de conception optique apparaît dans la simplification de l'architecture (utilisation de lentilles sphériques à la place d'asphériques), menant à une diminution du volume d'autant plus importante lorsque des lentilles peuvent être supprimées.

Deux lentilles sont au minimum nécessaires pour faire une caméra infrarouge bolométrique. Ces systèmes se caractérisent par une grande ouverture, typiquement $f/1$. La première caméra développée dans cette partie se rapproche de ces caméras traditionnelles. Le choix s'est porté sur un système simplifié avec des lentilles sphériques du commerce. Dans ces conditions, l'ouverture ne peut pas être importante ; dans mon cas, le rapport est fixé à $f/1,8$. Cette architecture est optimisée séparément pour les détecteurs plan et courbé. Ces deux systèmes vont permettre d'évaluer équitablement la performance de chacun.

Dans un premier temps, je rappellerai les particularités mécaniques du système à doublet de lentilles. Dans un deuxième temps, je présenterai les images et les premières observations qu'il est possible de faire sur ces photos. Enfin, les résultats de FTM permettront d'évaluer le gain optique d'un capteur courbé.

D.II.1 - Système à deux lentilles

Le premier système étudié est une caméra « simplifiée et faible coût », composée d'un diaphragme et de deux lentilles sphériques du commerce. Ce montage a été optimisé d'abord pour un détecteur plan puis courbé ; ainsi, les systèmes diffèrent par la position des éléments optiques.

D.II.1.1 - Dimensionnement du système

Dans le cas du système plan, les lentilles sont orientées face bombée contre face bombée, alors que dans le système courbe, elles sont placées dans le même sens. Les paramètres du système qui sont fixés pour ces deux montages sont les suivants :

- distance focale : 13,8 mm,
- ouverture : $f/1,8$,
- champ : 40° .

La longueur totale du détecteur plan au diaphragme est de 31,28 mm, et 30,27 mm dans le cas du plan focal courbé. La Figure D-26 illustre ces deux configurations.

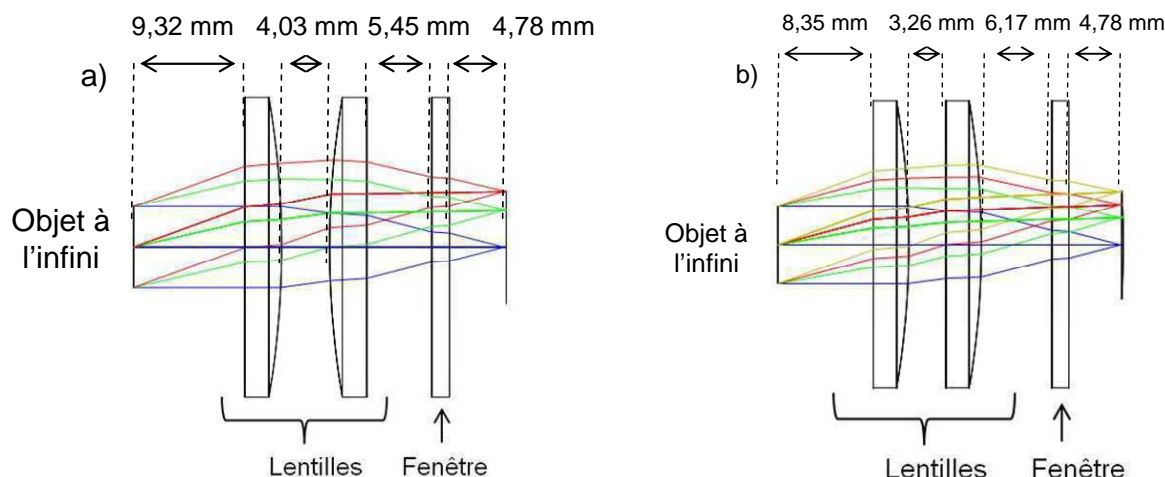


Figure D-26 : Schémas optiques et positionnement des différents éléments optiques
a) détecteur plan et b) détecteur courbé à un rayon de 80 mm (concave n°5)

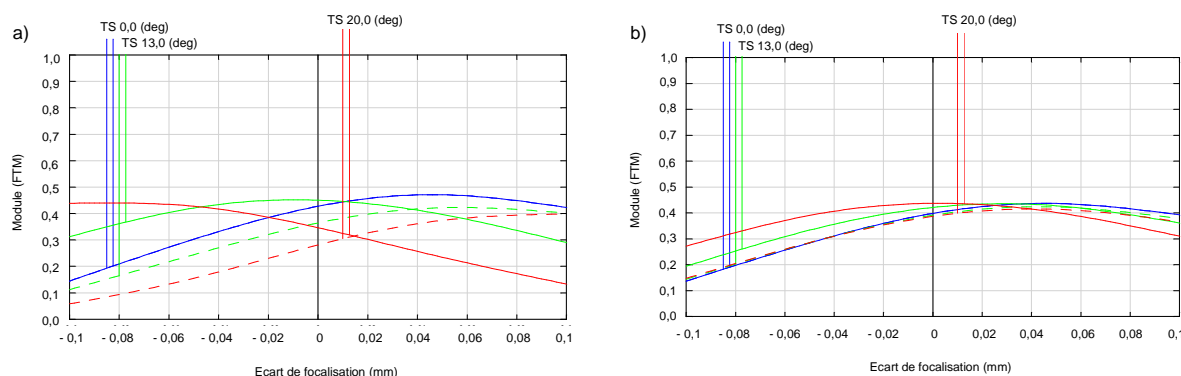
Etant donné les faibles distances entre les lentilles mentionnées sur la Figure D-26, il est difficile de créer un montage mécanique qui permette de régler chacune d'entre elles. Ainsi, les lentilles et le diaphragme forme un bloc optique monté dans un seul tube qui sera réglé.

D.II.1.2 - Tolérance de montage

L'étude de tolérancement a montré que l'incertitude de positionnement est de :

- 0,4 mm entre les deux lentilles,
- 0,1 mm entre les lentilles et le diaphragme, un écart de ± 1 mm entraîne une dégradation de 1 % à 2 % de la FTM.
- 10 μm entre les lentilles et le détecteur.

La tolérance la plus sévère est entre le groupe de lentilles et le détecteur. Les graphes de la Figure D-27, présentent la dégradation de l'image (exprimée selon la FTM) avec l'écart de focalisation en millimètre.



a) Détecteur plan

b) Détecteur courbe

Figure D-27 : Fréquence d'étude de 8 μm à 12 μm , fréquence spatiale de 20 cycles par mm

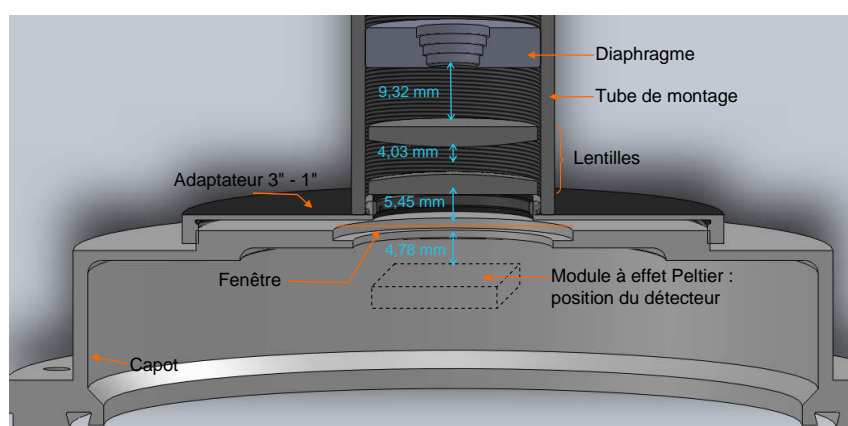
Ces graphes montrent la variation rapide de FTM avec un défocus maximum de $\pm 100 \mu\text{m}$.

Lorsque l'erreur de mise au point est égale à $-100\text{ }\mu\text{m}$, la FTM dans l'axe varie de 25 % dans le cas du système courbe et pratiquement 30 % pour le système plan. Un écart de $20\text{ }\mu\text{m}$ sur la mise au point dégrade la FTM de 5 % dans l'axe et de 6 % hors axe pour le système plan, alors qu'il dégrade uniquement les faisceaux dans l'axe de 2 % dans le système courbé.

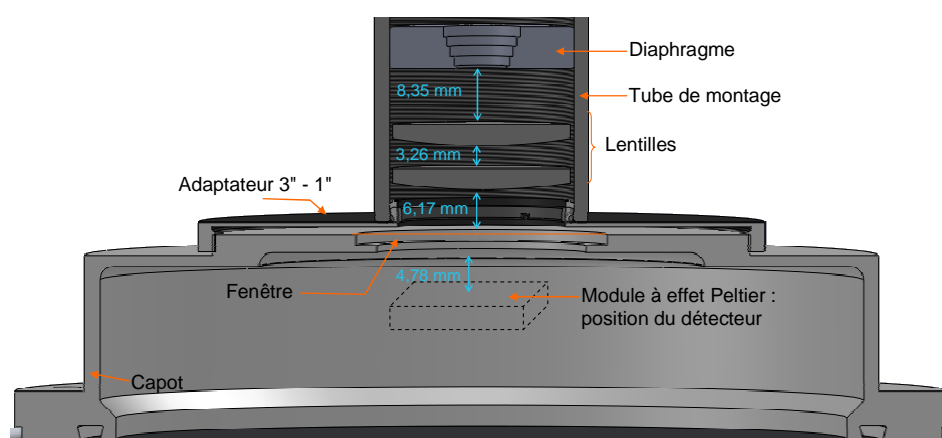
Le réglage du système optique est obtenu dans un premier temps par le positionnement des lentilles aux distances adaptées. La mise au point finale sera réalisée lors de l'observation des mires. Lors de ce réglage visuel, le maximum de signal est recherché, c'est-à-dire le maximum de la fonction de transfert ; or le maximum ne correspond pas au point de focalisation théorique. De plus, l'ajustement dans l'axe ne garantit pas le réglage optimal sur tout le champ. Cette étape est donc délicate et nécessite de trouver ce compromis de « meilleur réglage ». Etant donné que la variation de FTM, du système courbé, est plus faible, ce système sera plus complexe à régler que le plan.

D.II.1.3 - Montage optique

Cette étude de tolérances, a permis de valider le choix de placer les deux lentilles et le diaphragme dans le même bloc optique. La mise au point est faite par la rotation de l'ensemble par rapport au détecteur. La Figure D-28 présente les projections des deux systèmes, avec détecteurs plan et courbé, qui permettent le positionnement des lentilles.



A : Système à deux lentilles avec détecteur plan



B : Système à deux lentilles avec détecteur courbé

Figure D-28 : Plan des deux montages réalisés (issus de Solidworks)

D.II.2 - Images infrarouge obtenues

L'acquisition d'images a permis une première analyse qualitative. Le réglage de la netteté a permis de valider la course de l'ensemble adaptateur du capot – tube par rapport au détecteur. L'ajustement est également délicat du fait de l'évolution de la réponse du bolomètre dans le temps. Il faut régulièrement faire une correction appelée « correction deux points » qui consiste à étalonner sa réponse selon deux températures : un fond froid (plaque métallique) et un fond chaud (un corps noir). Ces deux valeurs permettent de déterminer la gamme de variation des tensions et obtenir une image plus stable.

D.II.2.1 - Images du système avec détecteur courbé

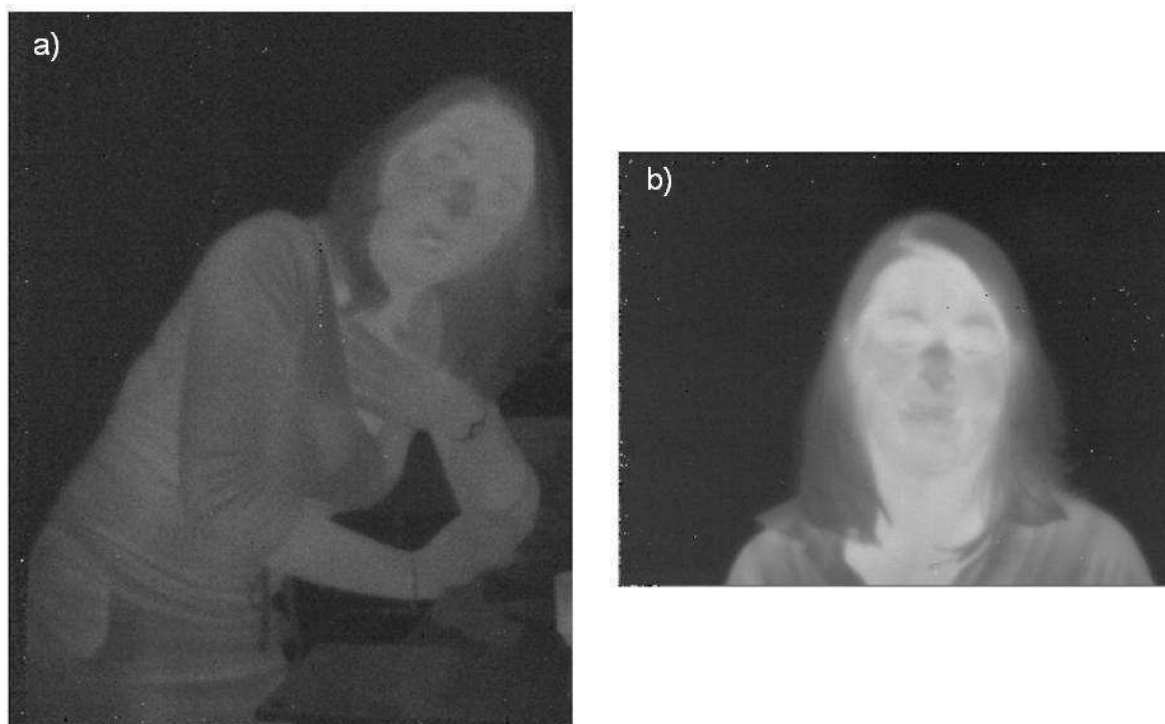


Figure D-29 : Photos prises avec a) le système doublet de lentilles ; b) le système imageant standard

La photo de la Figure D-29 a est obtenue avec le système de doublet de lentilles dédié au bolomètre courbé ; elle est comparée à celle de droite réalisée avec le système standard (Figure D-29 b). Nous constatons que la photo « a » est moins lumineuse mais les détails sont plus marqués et le contraste amélioré. La perte de luminosité entre les deux photos est liée au diamètre d'ouverture qui est plus important dans le système standard : le diamètre est double par rapport au système de doublet. Le flux lumineux entrant est donc moins important et le réglage est alors un peu plus difficile.

D.II.2.2 - Comparaison des systèmes optimisés plan et courbé

Les systèmes optimisés avec le détecteur plan et courbé ont ensuite été comparés. Les photos a et b de la Figure D-30 sont obtenues avec ces deux montages.

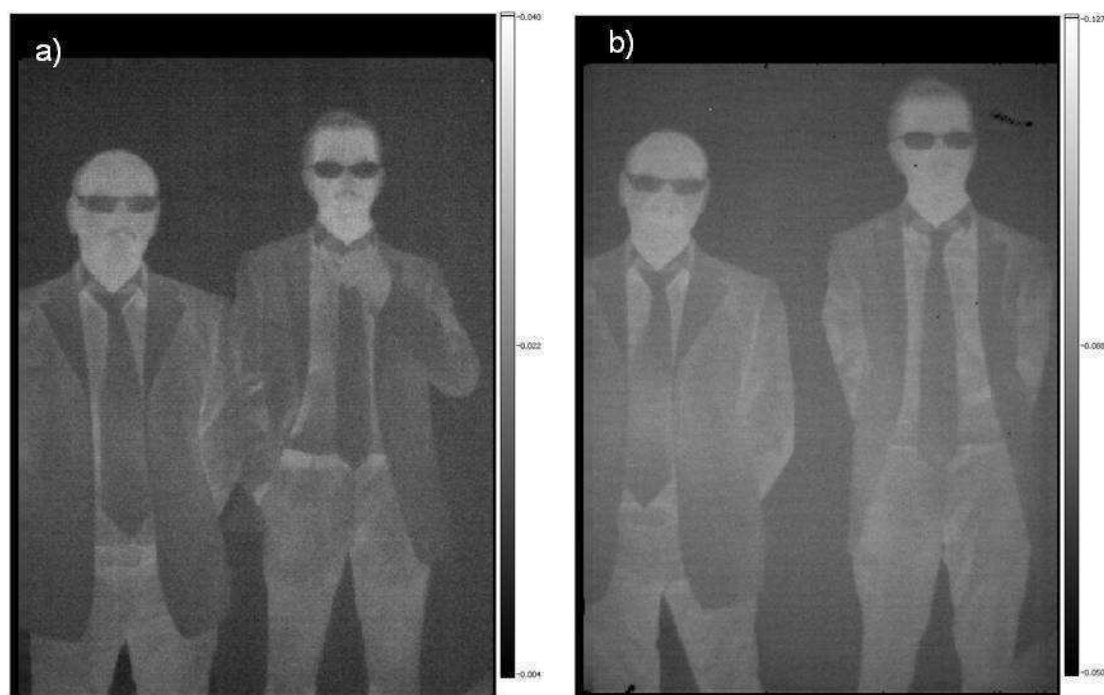


Figure D-30 : Système à doublet de lentille avec un détecteur : a) courbe ; b) plan

La photo faite avec le détecteur plan (Figure D-30 b) est moins nette sur la périphérie de l'image que celle prise avec le plan focal courbé (Figure D-30 a). Sur cette photo, les détails sont plus nombreux. Par exemple, les moustaches sont visibles et le contraste est plus net.

Les photos prises avec le bolomètre courbé sur le support optimisé (lentille plan convexe découpé avec le décentrement) profitent donc des optimisations technologiques de la première partie. Nous ne distinguons plus de zone bruitée sur la périphérie de la matrice.

La qualité optique obtenue avec ces bolomètres courbés est donc très bonne. Ce résultat est en lui-même une nouvelle validation du comportement électrique de cette nouvelle forme de détecteur. L'acquisition d'une image démontre, en effet, que le circuit de lecture est fonctionnel électriquement et que les pixels ne sont pas dégradés.

D.II.3 - Caractérisation électro-optique sur les systèmes à deux lentilles

Les images précédentes n'apportent qu'une information qualitative de ces détecteurs. Afin d'évaluer l'intérêt de la courbure, les systèmes seront comparés grâce à leurs fonctions de transfert de modulation (FTM). Ces mesures sont réalisées par la méthode expliquée dans la première partie évaluant la fonction de transfert de contraste (FTC).

D.II.3.1 - Fonction de Transfert de Modulation (FTM) théorique

La FTM théorique de ces systèmes optiques est présentée dans la Figure D-31. Elle correspond à un objet placé à l'infini et les éléments optiques sont positionnés comme dans l'expérience. Ces tracés de FTM sont issus du logiciel de conception Zemax.

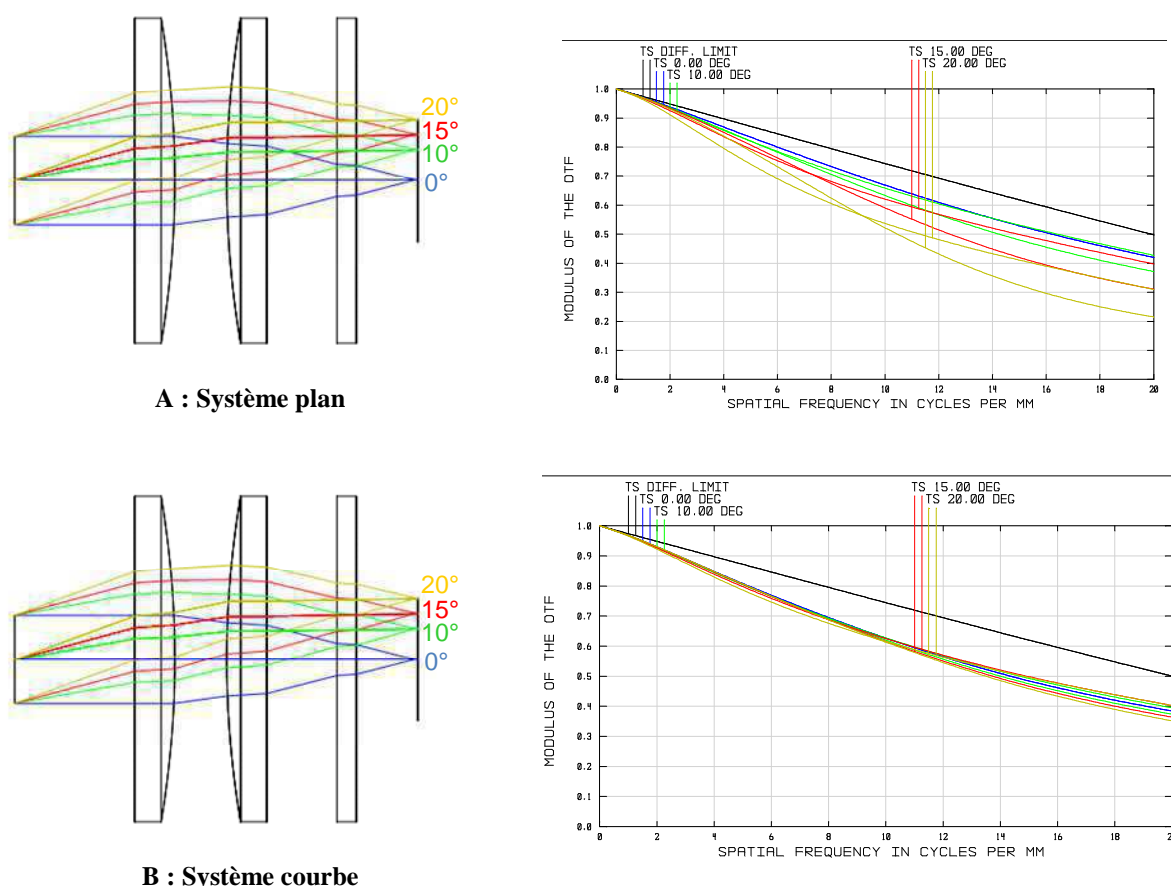


Figure D-31 : Schéma du système et FTM théorique pour le système avec le détecteur plan (A) et le détecteur courbé (B)

Les courbes bleue, verte, rouge et jaune sont respectivement celles des faisceaux inclinés à 0° (dans l'axe optique), à 10°, à 15° et 20° (Figure D-31). Les rayons hors axe se distinguent par les rayons sagittaux et tangentiels, notés *S* et *T*. La diffraction limite est identique pour ces deux systèmes ; à la fréquence de Nyquist (20 cycles/mm), leur modulation est de 50 %.

Ces courbes illustrent les avantages de la courbure du détecteur que j'ai détaillés dans le premier chapitre. Les FTM des deux systèmes se différencient par le niveau de réponse et par la variation de réponse dans le champ. Lorsque les fréquences spatiales augmentent, la réponse impulsionnelle entre les faisceaux dans l'axe et ceux hors axe varie. Le système plan présente une plus grande variation que le courbé. Par exemple, à la fréquence spatiale de 10 cycles/mm, la modulation du système plan est de 67 % pour les faisceaux paraxiaux alors qu'elle chute à 52 % pour les faisceaux hors axe. Dans le cas du système courbé, à la même fréquence spatiale, la modulation dans l'axe est de 62 %, et hors axe la réponse est de 61 %.

Il apparaît donc que la réponse du système courbé est plus uniforme dans le champ que celle du détecteur plan. Cet écart de réponse dans le champ croît lorsque les fréquences spatiales augmentent alors que, dans le système courbé, cet écart reste faible.

Cette variation est tracée en fonction de la fréquence spatiale (Figure D-32) ; la variation est exprimée comme étant la différence entre le maximum et le minimum de la modulation pour chaque fréquence spatiale. Sur ce graphe, la réponse du système plan montre bien une

dispersion de réponse plus importante. Son écart varie de 2,7 % à 21,7% tandis que le système courbé présente un minimum de 0,8 % et un maximum de 5 %.

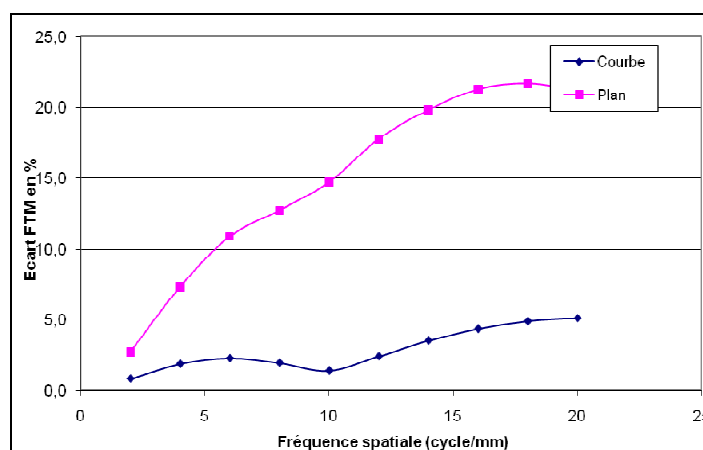


Figure D-32 : Ecart de réponse de modulation sur le champ en fonction de la fréquence spatiale

Bien que la modulation dans l'axe des deux systèmes soit égale, la réponse à la fréquence de Nyquist est trop dispersée dans le système plan pour avoir une bonne qualité globale de l'image. Le système courbé ne présente qu'une perte de modulation de 5 %. L'avantage apporté par le détecteur courbé est donc mis en évidence, principalement, par l'uniformité de la réponse.

D.II.3.2 - Résultats expérimentaux

Le déplacement de la mire permet de couvrir tout le champ optique. Le schéma de la Figure D-33 illustre les points d'analyse qui ont été mesurés. Quatre mesures sont faites : une dans l'axe optique (en bleu), et trois en des points décalés sur l'axe optique. La correspondance des couleurs permet de voir sur le bolomètre, les points considérés dans l'axe et hors axe.

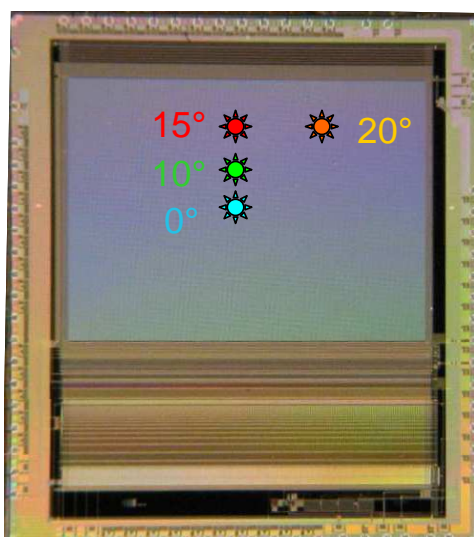
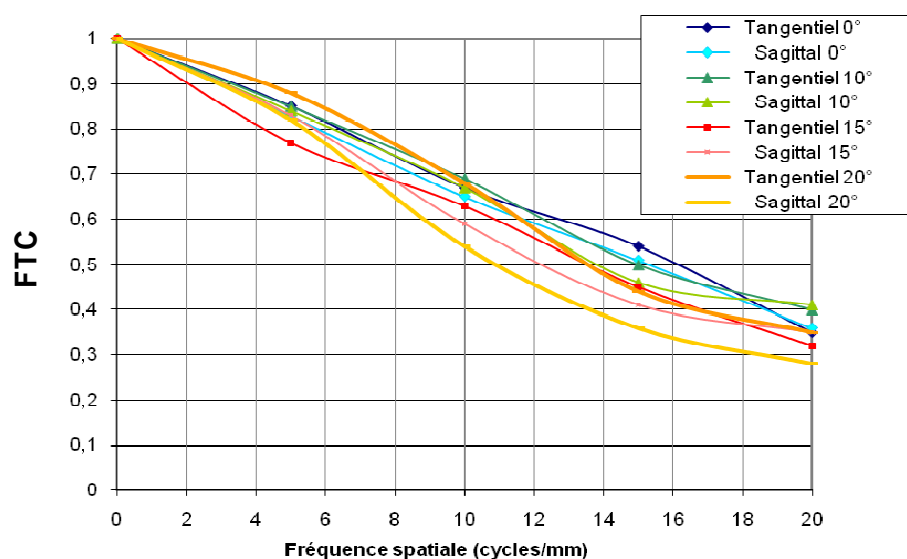
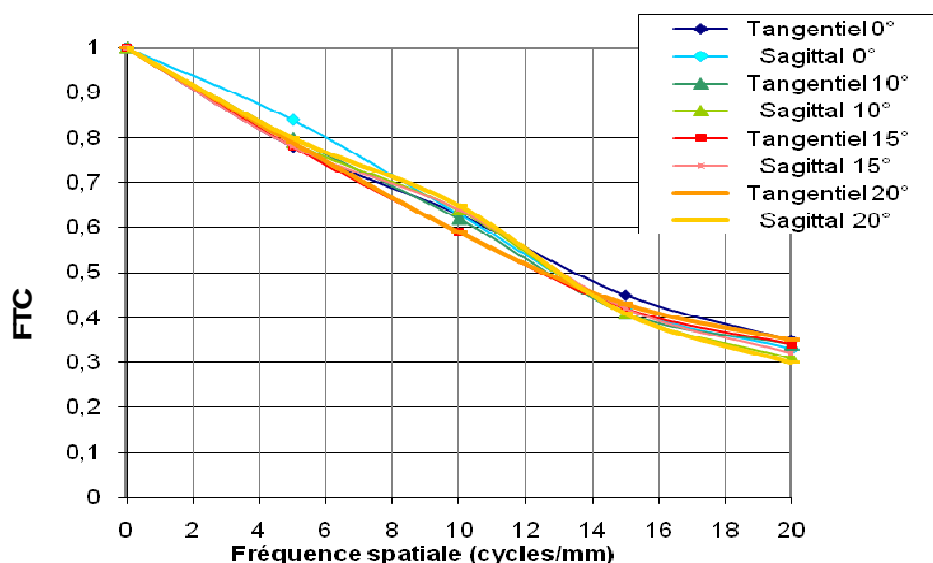


Figure D-33 : Positionnement des points de mesure

Les courbes ci-dessous sont les résultats des mesures faites sur le bolomètre plan de référence et le bolomètre n°5 ; il s'agit des mesures expérimentales de FTC.



A : Système avec le détecteur plan

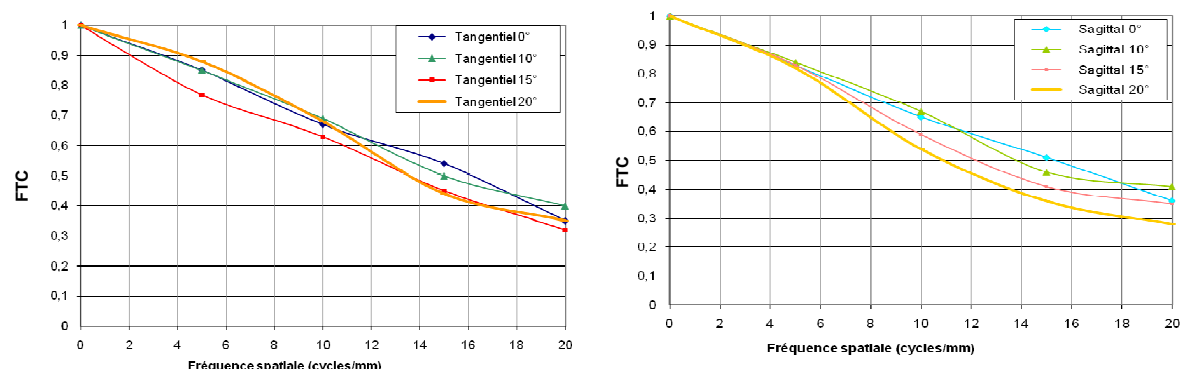


B : Système avec le détecteur courbé

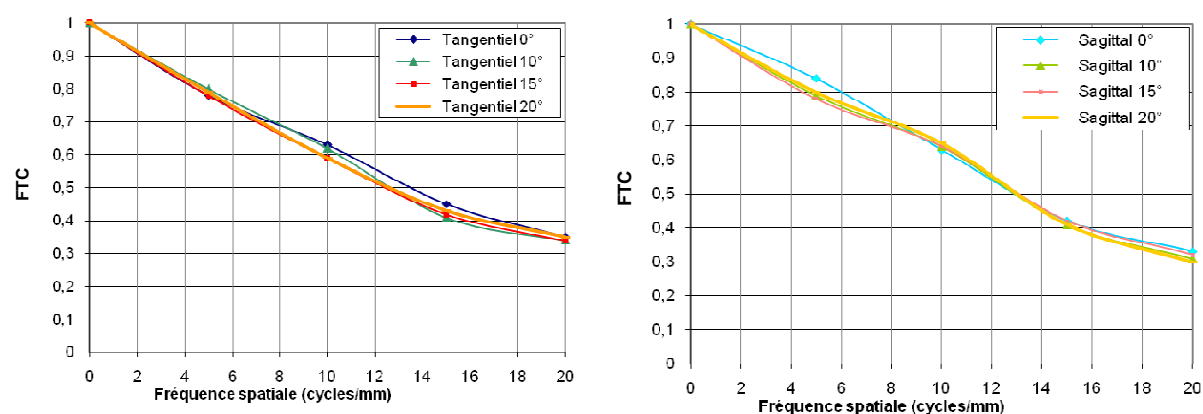
Figure D-34 : Courbes de FTC du bolomètre de référence plan et du courbé n°5

Ces courbes de FTC montrent le gain apporté par la courbure du détecteur. La réponse impulsionnelle est plus uniforme que celle du système plan. La perte de contraste suit la même évolution pour les deux architectures. A la fréquence de Nyquist, leur rapport de contraste est compris entre 0,3 et 0,4. Cependant, l'écart de contraste dans le champ est beaucoup plus important pour le système plan ; sa réponse à la fréquence de Nyquist s'étend sur un peu plus d'une graduation (13 %) alors que la réponse du système courbe est centrée sur une demi-graduation (0,6 %).

J'ai également étudié les réponses du système optique en fonction des orientations sagittales et tangentielles, en examinant les courbes suivantes.



A : Système avec le détecteur plan



B : Système avec le détecteur courbé

Figure D-35 : Courbes de FTC distinguées selon la réponse sagittale et tangentielle

La différence constatée entre les courbes sagittale et tangentielle est due à la présence d'astigmatisme dans le système optique. Il est possible, en décomposant les courbes, de connaître quelle orientation est majoritairement empreinte d'aberration.

Pour le système plan, la réponse tangentielle présente une plus grande dispersion qui augmente avec les fréquences spatiales. Au contraire, le système courbé a une réponse aussi homogène en tangentiel et en sagittal. Ainsi, ce système présente une meilleure correction des aberrations.

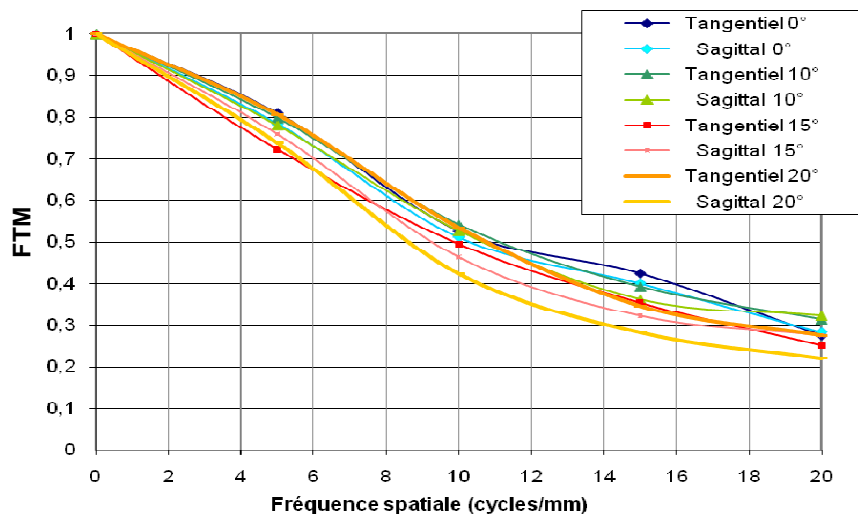
Pour avoir une meilleure analyse du comportement du bolomètre courbé, il est intéressant de comparer la réponse des systèmes courbé et plan avec la théorie. Ces comparaisons seront effectuées dans la prochaine partie.

D.II.3.3 - Comparaison théorie et expérience

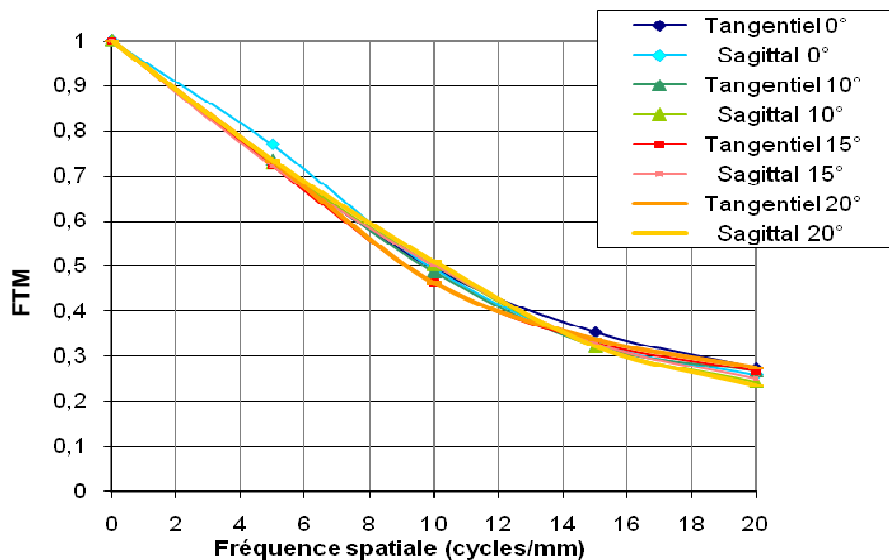
Les courbes précédentes sont obtenues à partir de la mesure des franges de contrastes (FTC). La théorie est présentée en termes de FTM. Un des deux résultats doit donc être traduit.

D.II.3.3.1 - Courbes FTM expérimentales

En multipliant les valeurs de FTC, à une fréquence spatiale donnée, par le coefficient $\pi/4$, on obtient une première approche de la FTM à cette fréquence. Etant donné que les mesures expérimentales sont des mesures discrètes avec cinq pas de mires, la traduction exacte des FTC en FTM ne peut être faite à tous les ordres (Équation D-4). La fonction de transfert de modulation est tracée en fonction de la fréquence spatiale dans la Figure D-36.



A : Système avec le détecteur plan



B : Système avec le détecteur courbé

Figure D-36 : Courbes FTM du système plan et courbe

Les courbes FTM montrent la même évolution en fonction des fréquences que les courbes de FTC. Dans les deux systèmes plan et courbé, la FTM à la fréquence de Nyquist se situe entre 0,2 et 0,3, ce qui représente un écart de 10 % avec les valeurs de FTC. La dispersion de réponse dans le champ varie entre 8 % et 14 % pour le système plan, alors que le système courbé a une dispersion constante lorsque les fréquences spatiales augmentent : l'écart est de 3,2 % à 4,7 %.

La comparaison de ces FTM expérimentales avec la simulation théorique obtenue par le logiciel Zemax, va permettre d'évaluer ces résultats.

D.II.3.3.2 - FTM théorique

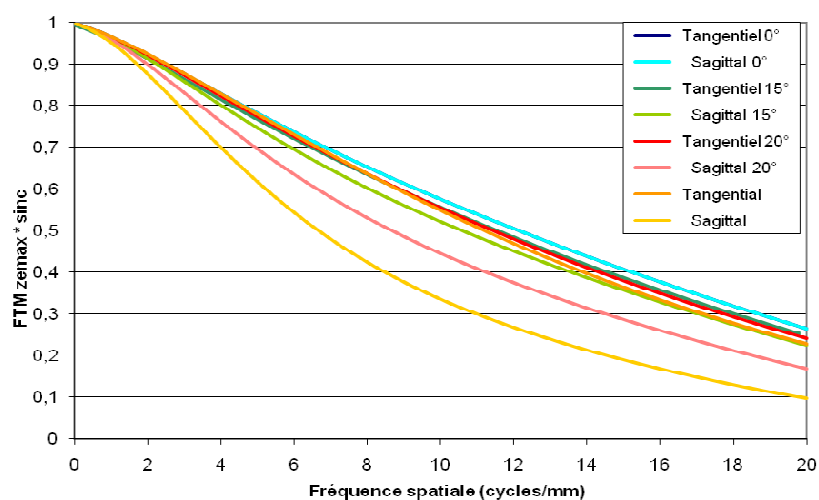
Les courbes FTM issues de Zemax correspondent aux FTM du système optique. Dans l'expérience, la FTM mesurée est le produit des FTM de tous les systèmes électro-optiques mis en cascade, principalement le système optique et le détecteur. La comparaison entre la théorie et l'expérience ne peut donc pas être faite directement.

Dans le cas d'un détecteur continu, la réponse impulsionnelle à une excitation ponctuelle est une impulsion de Dirac, donc la FTM du détecteur continu est l'unité ; c'est le cas des simulations de Zemax. Dans l'expérience, le détecteur est « pixellisé » ; sa réponse n'est donc plus un pic de Dirac. Le pixel se comporte idéalement comme une porte. L'intensité se dégrade au passage du détecteur qui a une réponse en sinus cardinal. Ainsi, dans le cas d'étude, la fonction de transfert de la matrice de pixel est un sinus cardinal au pas pixel, qui est de 25 μm dans le cas du bolomètre. L'équation est donnée à Équation D-7.

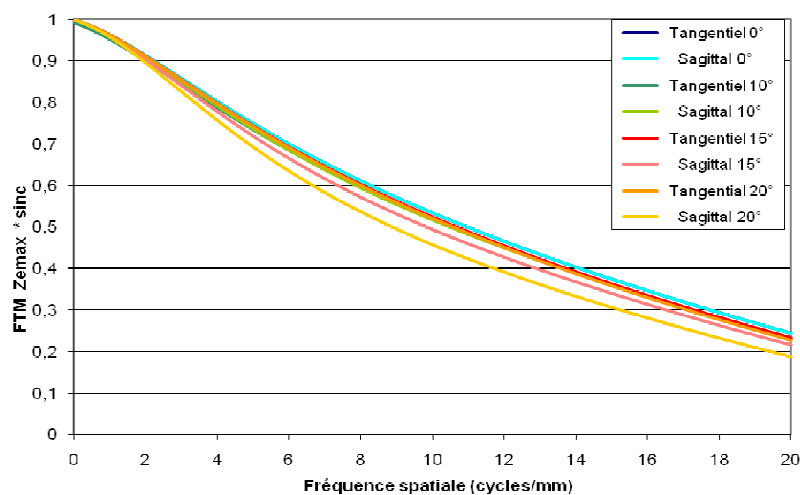
$$\text{Sinc}(v) = \frac{\sin(\pi v \cdot 0,025)}{\pi v \cdot 0,025}$$

Équation D-7 : Sinus cardinal avec v la fréquence et 0.025 le pas pixel en mm

Cette matrice de pixels apporte donc une perte d'intensité qu'il est nécessaire de prendre en compte pour comparer l'expérience avec la théorie. De plus, ces FTM théoriques sont des courbes idéales ; elles sont calculées avec un objet à l'infini ce qui ne correspond pas exactement à la réalité. Dans l'expérience, l'infini a été fixé pour une distance donnée (1,7 m) entre le diaphragme et les mires. Avec ces paramètres, les FTM théoriques sont présentées à la Figure D-37.



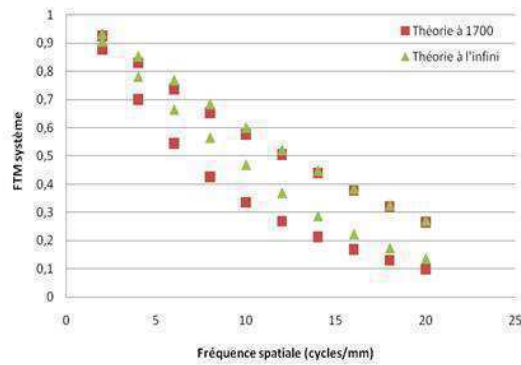
A : Système plan



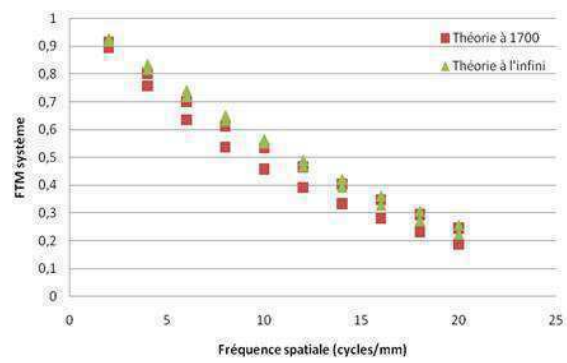
B : Système courbe

**Figure D-37 : Courbes de FTM théoriques du système plan et courbe
Mires à 1,7 m et prise en compte de la FTM détecteur**

Ces courbes FTM sont similaires à la théorie lorsque les mires sont à l'infini. Cependant, la dispersion, pour les deux systèmes, est plus importante lorsque l'objet est localisé à 1,7 m (Figure D-38). Pour mettre en évidence cette dispersion, les graphes ci-dessous représentent les enveloppes des courbes FTM : pour une fréquence d'échantillonnage donnée, les deux points minimum et maximum sont tracés. Dans le système courbé la dispersion est de 6 %, alors qu'à l'infini l'écart est de 2,6 % ; dans le système plan, l'écart est de 19 %, alors qu'il est de 13,5 % dans le système à l'infini.



A : Système plan

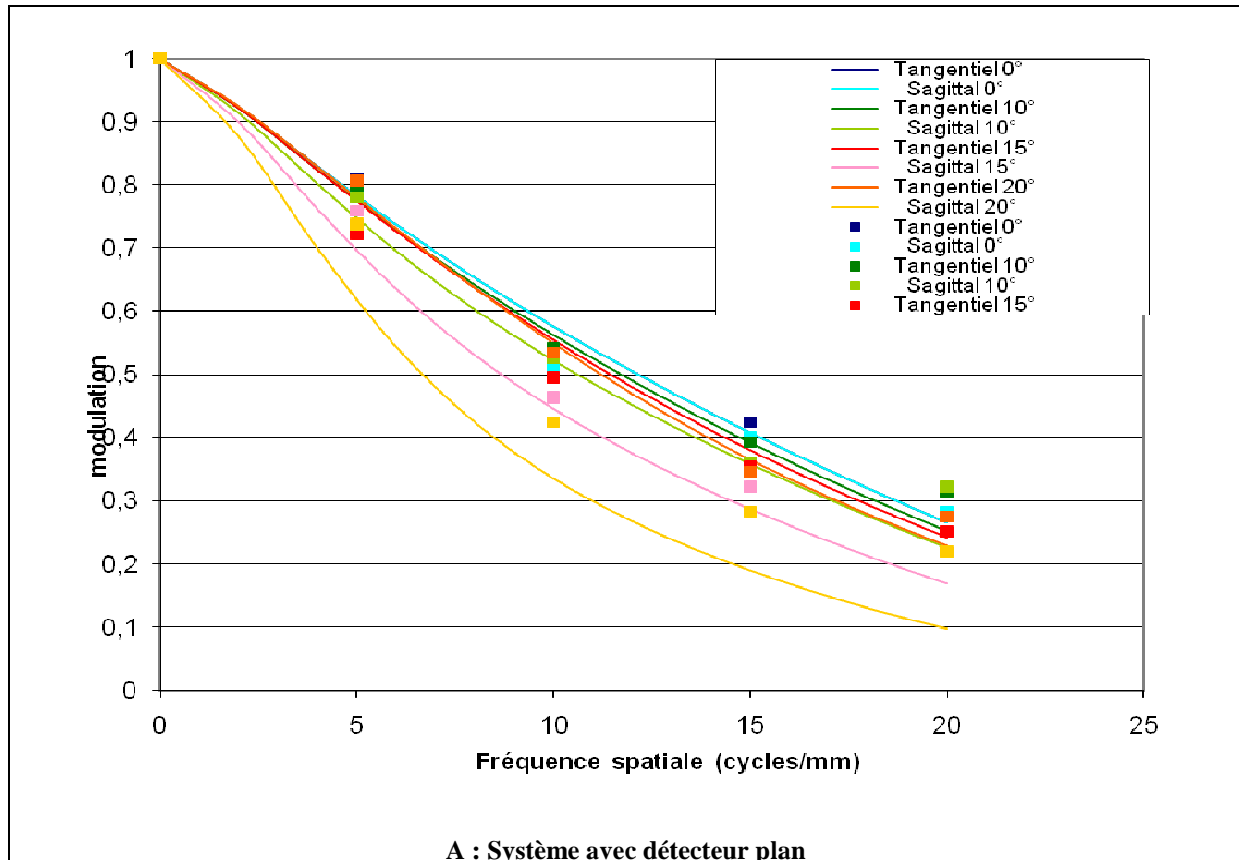


B : Système courbe

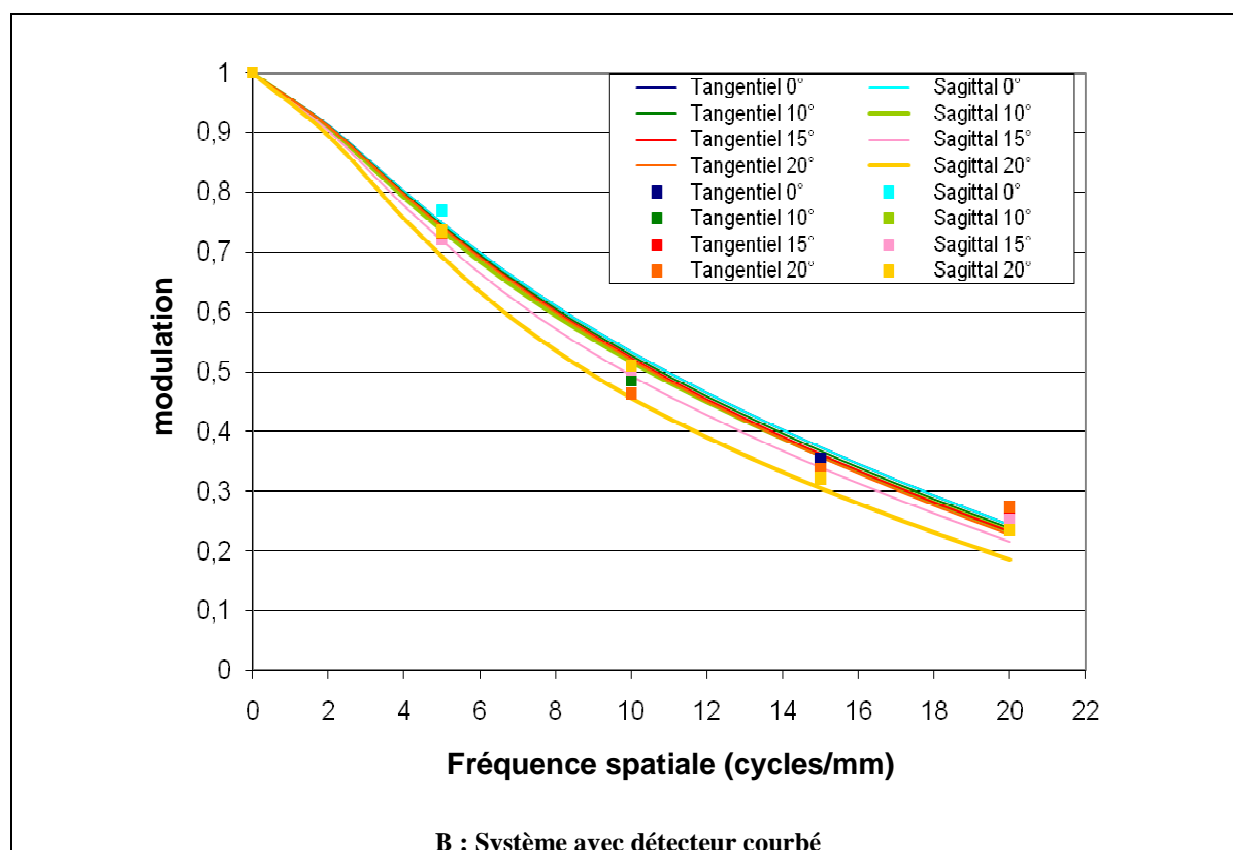
**Figure D-38 : Dispersion des courbes FTM dans les deux systèmes (Écart entre le minimum et le maximum pour chaque fréquence d'échantillonnage)
Comparaison de la théorie à l'infini et avec l'objet placé à 1,7 m**

D.II.3.3.3 - Comparaison FTM théorique et expérimentale

La Figure D-39 montre la comparaison entre les FTM théoriques et celles obtenues par l'expérience. Les courbes sont issues de la théorie et les carrés sont les résultats expérimentaux.



A : Système avec détecteur plan



**Figure D-39 : Courbes FTM prévues par simulation (lignes) et celles obtenues par l'expérience (carrés)
Objet placé à 1,7 m**

Ces graphes montrent que les résultats expérimentaux sont conformes aux résultats théoriques. La dispersion mesurée est encadrée par les valeurs de simulation (théorie).

Il apparaît que la dispersion de réponse mesurée sur le système plan est plus proche de la théorie où la mire est placée à l'infini (Figure D-38 A). La différence entre ces deux montages se situe essentiellement dans la position du diaphragme (Tableau D-2) et la mise au point manuelle (position des optiques par rapport à la fenêtre). L'écart le plus important constaté dans ce tableau reste faible eu égard aux tolérances d'usinage des éléments mécaniques et à la difficulté de réglage du diaphragme dans le tube fileté.

	Mire à l'infini	Mire à 1,7 m
Diaphragme / 2ème lentille (mm)	9,326	9,564
Entre lentilles (mm)	4,037	4,037
Fenêtre / 1er lentille (mm)	5,452	5,559

Tableau D-2 : Ecart de positionnement dans le système plan

La distance entre la fenêtre et la deuxième lentille constitue la variable critique de la mise au point optique obtenue visuellement. Il est donc possible, en ajustant cette position, de se rapprocher de l'architecture idéale où la mire est à l'infini.

Il semble donc que le système plan ait été mieux ajusté que le système courbe puisque la dispersion se rapproche de la dispersion théorique à l'infini. L'étude de tolérancement avait effectivement montré que le système courbe est plus difficilement réglable que le plan.

Avantage optique d'un système avec un plan focal courbé

Cette partie a permis de caractériser le bolomètre courbé dans un système à deux lentilles. La réponse du système courbé est plus homogène dans le champ que celle du système plan et donc mieux résolue. Ce montage est sensible à la position des lentilles : la tolérance est de 10 μm . Cependant, l'expérience menée avec la tolérance mécanique a permis de mettre en évidence l'avantage de la courbure.

Suite à la réalisation de cet ensemble optique, comparable aux caméras typiques des bolomètres, la partie suivante va être consacrée à un système miniature, très simple, constituée d'une seule lentille.

D.III - Système bio-inspiré : l'œil infrarouge

Le deuxième système étudié est basé sur une architecture simplifiée au maximum comportant une seule lentille. Ce système s'inspire de la structure de l'œil humain ; le détecteur est courbé en concave et ne contient qu'une lentille. Pour concentrer les rayons lumineux sur la rétine, l'œil humain utilise le cristallin qui est une lentille biconvexe, à la différence de notre œil infrarouge qui sera de forme asphérique. L'objectif de cette architecture est de montrer que le capteur courbe permet de faire des systèmes miniatures très simples avec une qualité optique qui ne peut pas être obtenue avec un capteur plan.

Dans un premier temps, nous détaillerons l'architecture optique développée en précisant le montage mécanique réalisé. Ensuite, nous comparerons les résultats obtenus avec le système plan. La deuxième partie présentera les photos infrarouges prises avec notre système, et nous analyserons, de manière qualitative, les résultats obtenus. Enfin, les mesures de FTC permettront une analyse quantitative, qui sera comparée aux valeurs issues du capteur plan.

D.III.1 - Système optique à une lentille

L'œil humain est une structure creuse globalement sphérique composée de la cornée (milieu d'indice 1,33), de l'iris (c'est-à-dire le diaphragme), du cristallin (milieu d'indice 1,413) et de la rétine courbe. La Figure D-40 illustre ce système. L'ensemble optique est constitué de la cornée et du cristallin, et forme donc une lentille convergente ; le cristallin est la lentille principale du système dont la courbure est modifiée pour accommoder sur la rétine.

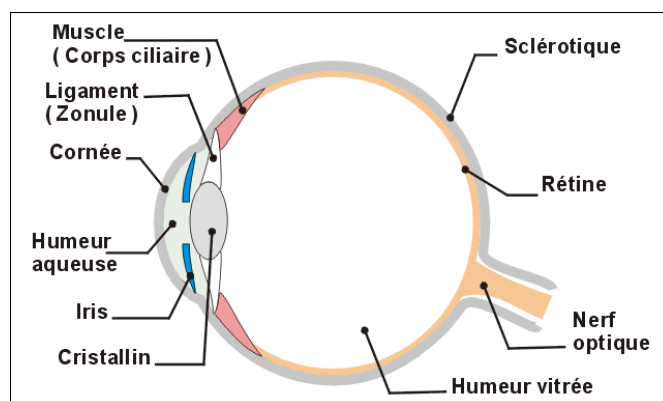


Figure D-40 : Schéma d'un œil humain

L'œil humain peut donc se réduire à un système simple avec une seule lentille biconvexe, un diaphragme et une rétine. Le globe oculaire a un diamètre de 25 mm et la rétine est courbée sur une longueur de 23 mm, le rayon de courbure est approximativement de 6 mm.

Le système « œil infrarouge » réalisé est composé d'une seule lentille et d'un détecteur bolométrique courbé, qui joue le rôle de la rétine concave. Le bolomètre est courbé à un rayon de 80 mm ; ce système a un diamètre de 27,3 mm et il est donc aussi compact qu'un œil humain. Il possède une seule lentille asphérique qui est complexe comme l'unique lentille de l'œil. Ce système est imageant à l'infini.

D.III.1.1 - Montage optique de l'œil infrarouge

La Figure D-41 présente le schéma de ce système optique qui est caractérisé par les paramètres suivants :

- distance focale : 12,4 mm,
- ouverture : $f/1,8$,
- diamètre du diaphragme : 6,88 mm,
- angle de champ : 60° .

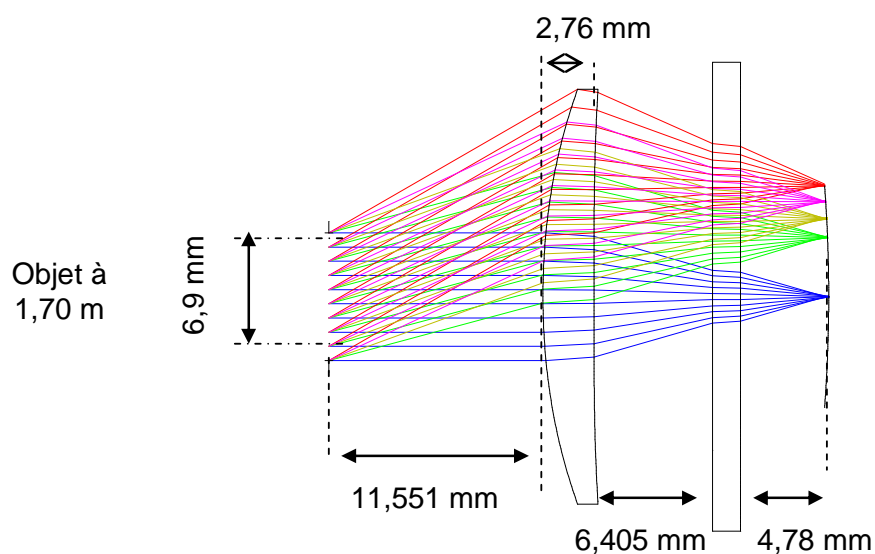


Figure D-41 : Schéma du système optique – Objet placé à 1,70 m Conditions expérimentales

Pour un système aussi miniature, la lentille a une forme complexe, usinée spécialement pour ce système. La Figure D-42 a présente la projection de cette lentille ; la face extérieure a un rayon de courbure de 37,423 mm et présente avec la face intérieure des surfaces coniques Figure D-42 b.

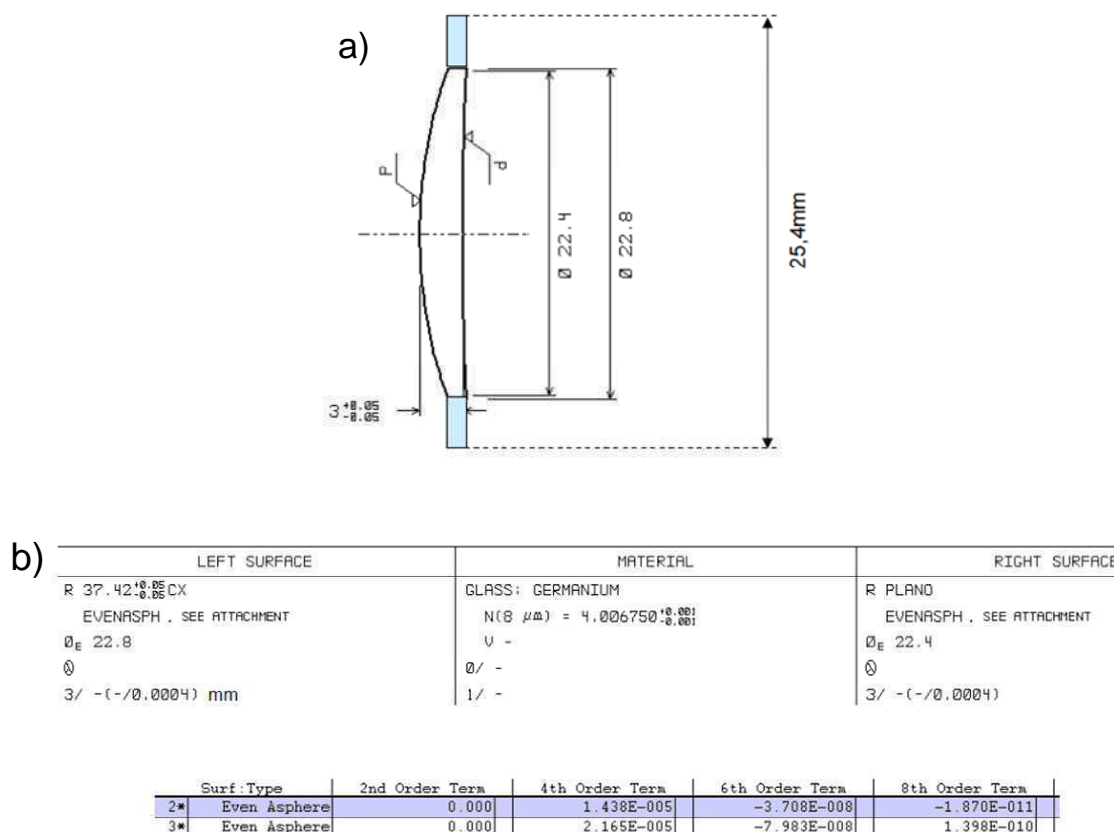


Figure D-42 : Plan de la lentille asphérique utilisée
a) projection ; b) tableau des dimensions et rayons de courbures

Cette lentille peut être maintenue comme les lentilles du commerce grâce à l'anneau de couleur bleue sur la Figure D-42 a. Le diaphragme a un rayon de 3,46 mm, correspondant à celui utilisé dans le système à deux lentilles. La lentille et le diaphragme sont montés dans un même tube, qui est au contact de l'adaptateur du capot. L'intégration des éléments optiques est donc similaire au montage précédent. Le réglage s'effectue par le déplacement du bloc optique placé dans un seul tube, via l'ajustement de la position de l'adaptateur 3" - 1".

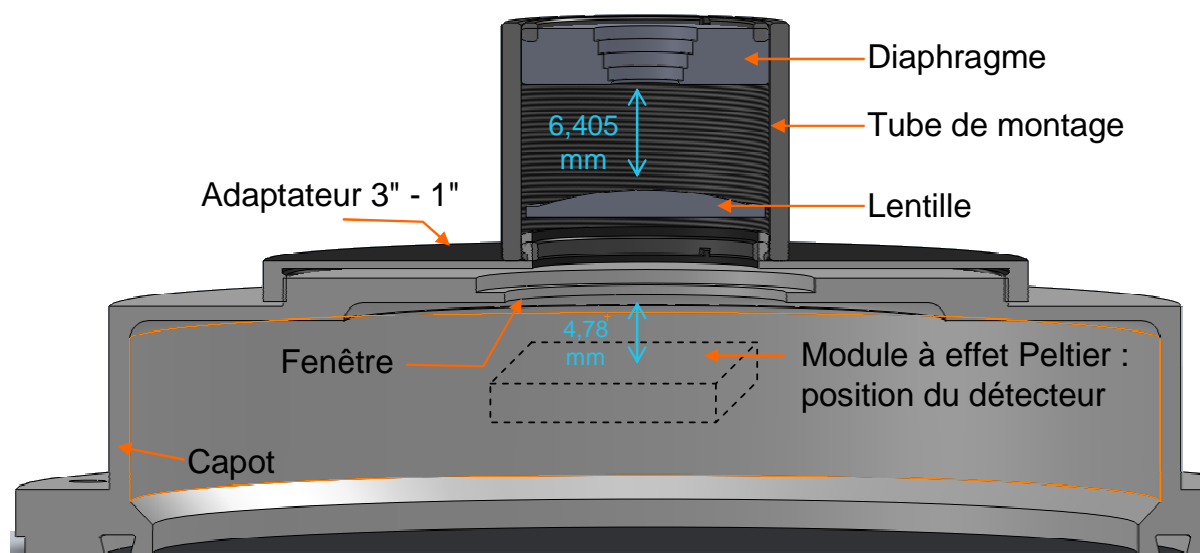


Figure D-43 : Montage mécanique du bloc optique sur le capot

Ce système avec une rétine courbe est comparé au même système avec un détecteur plan.

D.III.1.2 - FTM théorique des systèmes avec un détecteur plan et courbé

L'architecture avec le détecteur plan et la même lentille asphérique, est présentée dans la Figure D-44. Sa courbe de FTM montre que le système plan a une grande inhomogénéité de réponse dans le champ, et perd en contraste à la fréquence de Nyquist.

A cette fréquence, dans l'axe, la perte de modulation est identique pour ces deux systèmes (écart de 2 %). Par contre, à 30° d'inclinaison, elle est bien plus importante pour le détecteur plan, qui a un contraste nul ($\sim 0,03$). Au contraire, le système courbé a un contraste de 0,24 en tangentiel et 0,16 en sagittal.

Les graphes montrent clairement la dispersion des réponses entre les faisceaux dans l'axe et hors axe, qui croît lorsque les fréquences spatiales augmentent. Le système plan a un écart minimal de 21 %, et maximal de 65 %, alors que le système courbé a une réponse plus uniforme avec un minimum d'écart de réponse de 5 % et un maximum de 31 % (soit la moitié de la dispersion du système plan) (Figure D-45).

Cette dispersion de réponse est très rapidement marquée dans le système plan, où le maximum d'écart est atteint pour des fréquences spatiales faibles (6 cycles/mm), alors que la réponse du détecteur plan se creuse progressivement jusqu'à atteindre un maximum constant de la fréquence spatiale de 12 cycles/mm jusqu'à la fréquence de Nyquist.

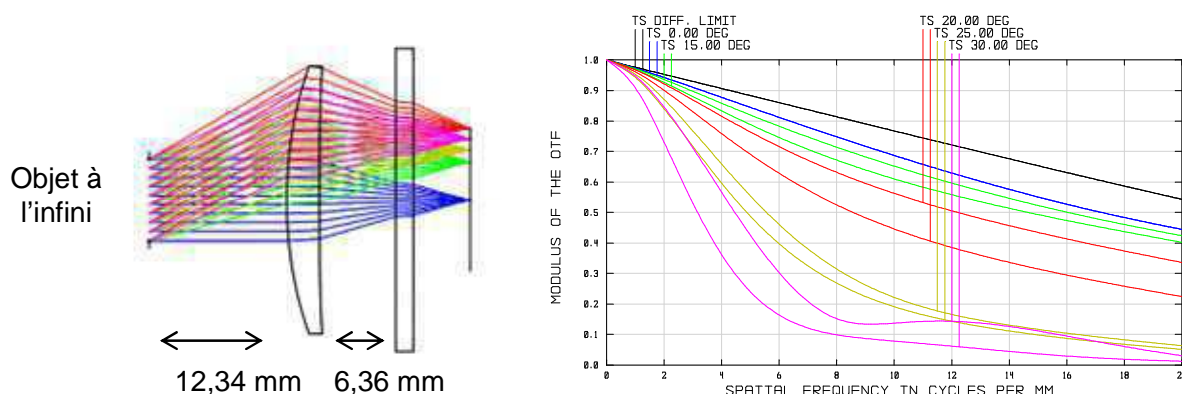


Figure D-44 : Système avec un détecteur plan et courbe FTM théorique (objet à l'infini)

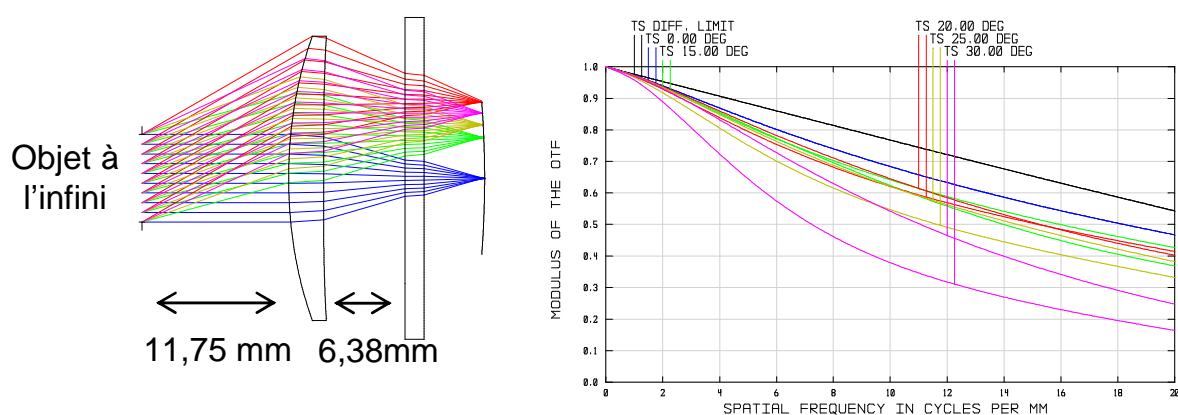


Figure D-45 : Système avec un détecteur courbé à 80 mm de rayon et courbe FTM théorique (objet à l'infini)

D.III.1.3 - Système optimisé pour le détecteur plan

La lentille asphérique a été usinée spécialement afin de répondre au système courbé ; sa forme n'est donc pas optimisée pour le système plan. Cependant, les simulations optiques effectuées avec le logiciel Zemax, permettent d'étudier le système avec une lentille asphérique optimisée (Figure D-46). Dans ce cas, la lentille possède deux faces courbées.

La courbe FTM montre toujours une qualité optique dégradée dans le champ ; la réponse est inhomogène avec un écart de 38 %. Ainsi, le système optimisé pour le plan ne permet pas d'obtenir une meilleure résolution que celle obtenue avec un détecteur courbe.

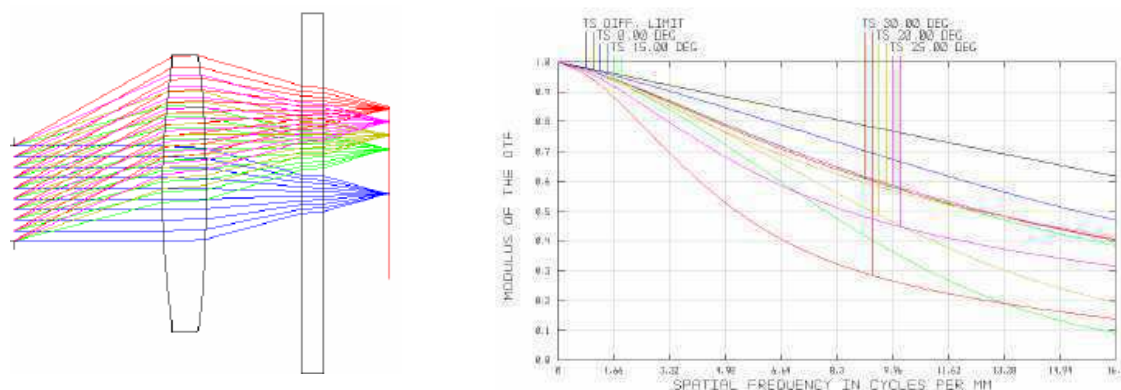


Figure D-46 : Système avec le détecteur plan et une lentille asphérique optimisée ; Courbe FTM théorique (objet à l'infini)

Dans l'étude qui va suivre, ce système optimisé ne sera pas développé. Nous comparerons les deux systèmes plan et courbe avec la même lentille asphérique. Dans une première partie, nous traiterons la qualité des images obtenues par les deux procédés, et l'analyse quantitative sera faite dans la troisième partie avec les mesures FTM.

D.III.2 - Images obtenues par l'œil infrarouge

Les premières images obtenues avec cet œil infrarouge sont présentées dans la Figure D-47.

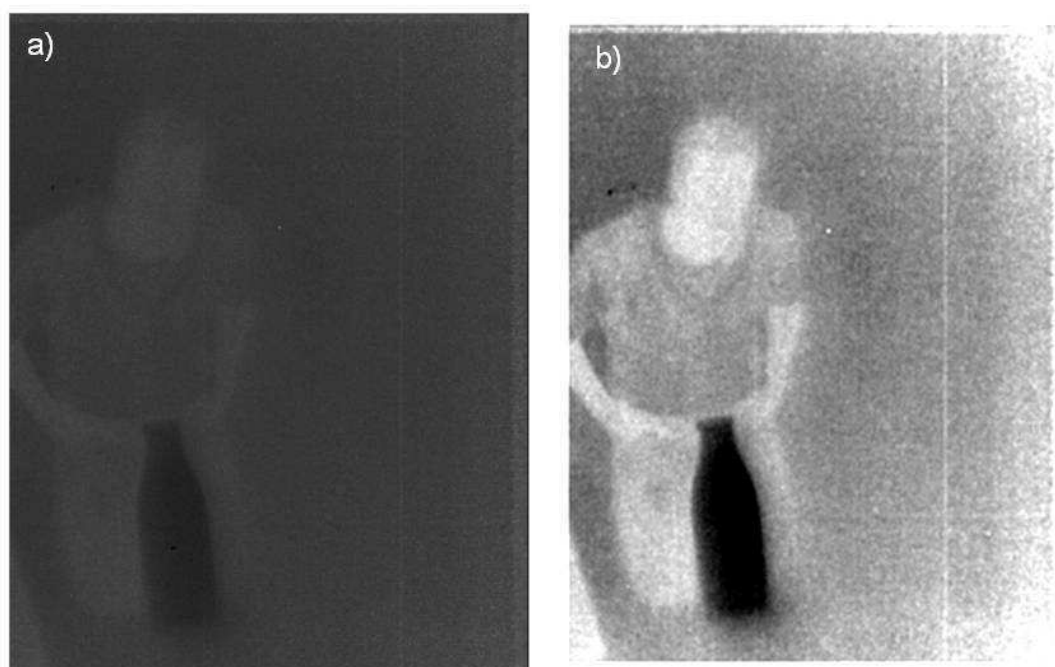


Figure D-47 : Première image a) Brute ; b) Après traitement

La Figure D-47 a est la toute première image qui a permis de valider le concept. Elle a été réalisée avant le traitement antireflet de la lentille, elle est donc très peu contrastée. Le flux reçu est trop faible pour distinguer les détails, néanmoins les notions de chaud et froid sont

bien différenciées ; la bouteille froide se détache sur le devant de la scène, et son enveloppe a un contour bien distinct. La photo de la Figure D-47 b est issue d'un post traitement de l'image ; l'augmentation de l'intensité lumineuse et des contrastes ont permis de faire apparaître plus de détails.

Ces premières images montrent que le système est bien résolu, bien que le signal soit noyé dans du bruit. Le système optique est donc fonctionnel et le traitement anti reflet de la lentille en germanium a été effectué pour réaliser les mesures de franges de contrastes.

En effet sans cette étape, du fait de l'indice de réfraction élevé ~ 4 , chaque face de la lentille réfléchit 36 % de la lumière incidente et donc seulement 64 % du flux est transmis. Avec la deuxième face, une partie de la lumière est réfléchie, et en négligeant les réflexions du deuxième ordre, seulement 41% de la lumière incidente est transmise par la lentille. Le flux en sortie de la lentille en germanium est donc très faible.

$$R = \left(\frac{n' - n}{n' + n} \right)^2 \quad \text{et} \quad T = 1 - R$$

Équation D-8 : Coefficient de réflexion R et transmission T

Cette première image illustre l'importance du choix du matériau des dioptries dans une conception optique, et notamment du traitement antireflet. Les images obtenues après traitement sont présentées à la Figure D-48 A.

Les images de la Figure D-48 B sont prises avec le détecteur plan et la lentille asphérique dans l'architecture œil infrarouge.



A : Système courbé

B : Système plan



A : Système courbé

B : Système plan

Figure D-48 : Images avec le détecteur courbé et plan

Ces images confirment le bon fonctionnement du composant, et apportent la preuve qu'une seule lentille peut permettre d'imager correctement une scène avec le détecteur courbé. Le système courbé permet notamment de distinguer les détails avec un meilleur contraste.

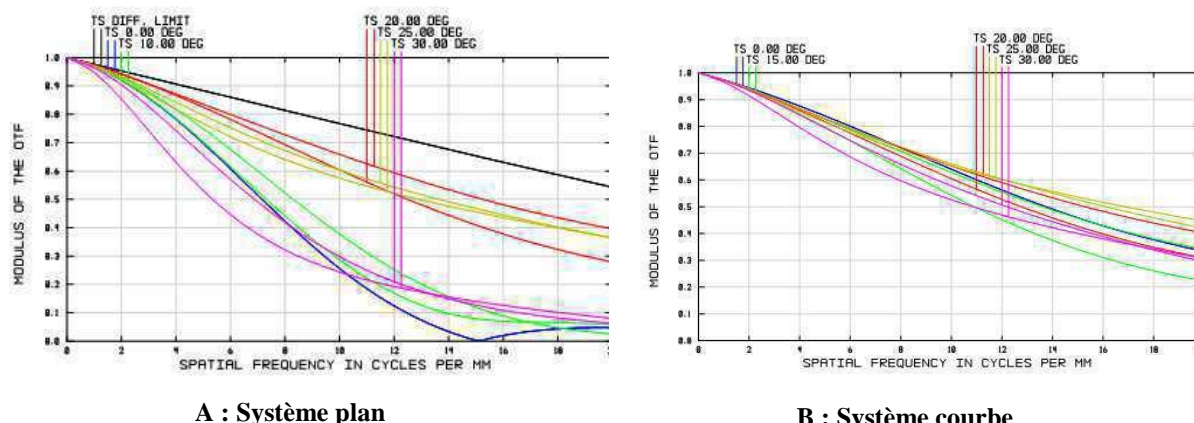
D.III.3 - Etude électro-optique des systèmes œil humain

Dans cette partie, nous allons développer la caractérisation électro-optique des systèmes. Leur réponse sera étudiée par la mesure de franges de contraste. Ces mesures FTC suivent la même procédure que celle détaillée dans les parties précédentes.

La mire est placée à 1,7 m du détecteur ; cette distance déterminée entre l'objet et le détecteur impose un ajustement des distances par rapport à la théorie présentée dans la première partie.

D.III.3.1 - FTM théorique

Pour une position des mires à 1,7 m, l'optimisation obtenue avec le logiciel Zemax diffère de celle théorique. Les FTM théoriques à 1,7 m sont présentées dans la Figure D-49.



A : Système plan

B : Système courbe

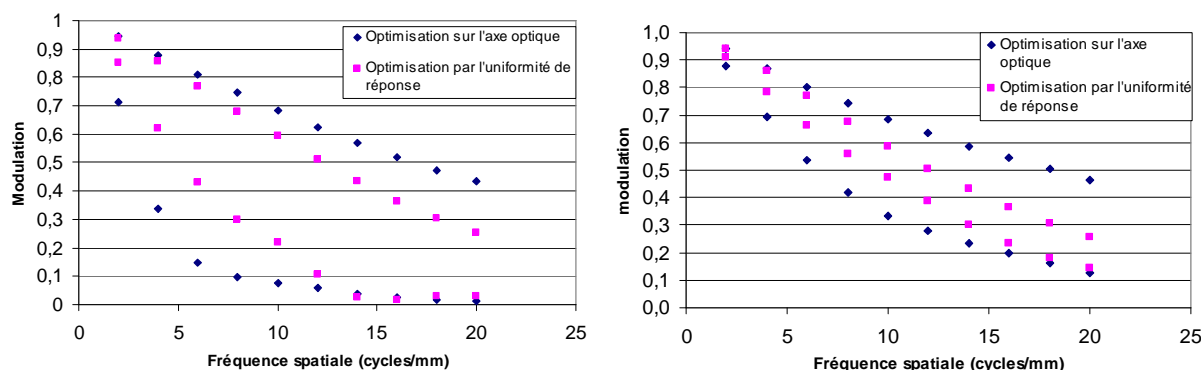
Figure D-49 : Courbe de FTM pour un système plan et courbé ; mire à 1,7 m

Ces montages ne sont pas optimisés dans l'axe ; la modulation des faisceaux paraxiaux (courbe bleue) n'est pas maximale. Cependant, l'ensemble du système répond uniformément. La variation maximale est de 40 % dans le montage plan et de 24 % dans le système courbe.

Afin de valider ce choix d'architecture, la Figure D-50 compare les deux méthodes d'optimisation :

- en bleu : optimisation sur l'axe optique,
- en rose : uniformisation de la réponse dans le champ.

Ces graphes sont les enveloppes des courbes FTM selon chaque méthode d'optimisation ; seules les valeurs minimale et maximale des FTM sont tracées pour chaque fréquence spatiale.



A : Système plan

B : Système courbe

Figure D-50 : Optimisation des FTM selon les deux méthodes
Tracée des courbes FTM avec les minimum et maximum pour chaque fréquence spatiale

L'optimisation sur l'axe optique montre une variation de réponse impulsionnelle importante. De plus, le gain en modulation est également plus important dans les systèmes optimisés par l'uniformisation. Dans le système courbé, la modulation chute en dessous de 20 % pour une fréquence spatiale de 18 cycles/mm, alors qu'une optimisation dans l'axe, chute à ce niveau pour une fréquence spatiale de 8 cycles/mm. Le même comportement est observé sur le système plan.

J'ai donc choisi d'optimiser ces systèmes de manière à augmenter l'uniformité de réponse. Le Tableau D-3 présente les distances des systèmes réalisés. Le montage mécanique est tel que l'ajustement maximum est de 0,5 mm en s'approchant du détecteur.

Distance entre éléments optiques	Système plan	Système courbé
Objet – Diaphragme	1700 mm	1700 mm
Diaphragme – Lentille	11,894 mm	11,551 mm
Lentille – Fenêtre	6,286 mm	6,405 mm
Fenêtre – Détecteur	4,78 mm	4,78 mm

Tableau D-3 : Positions des éléments optiques avec l'optimisation par l'uniformité de réponse

D.III.3.2 - Résultats expérimentaux

Le réglage est effectué en premier lieu dans l'axe, puis un test hors axe permet de valider le montage réalisé.

La FTC est mesurée sur quatre positions différentes présentées sur la Figure D-51 : $P0$ correspond à la position dans l'axe, et les positions $P1$, $P2$ et $P3$ s'éloignent du centre de la matrice. Le calcul de la position des mires dans la matrice permet de déduire l'angle de vue sous lequel les mesures sont réalisées. La position $P0$ correspond à 0° , la position $P1$ est mesurée à 5° d'inclinaison, la position $P2$ est à 10° et la position $P3$ est à 15° de champ.

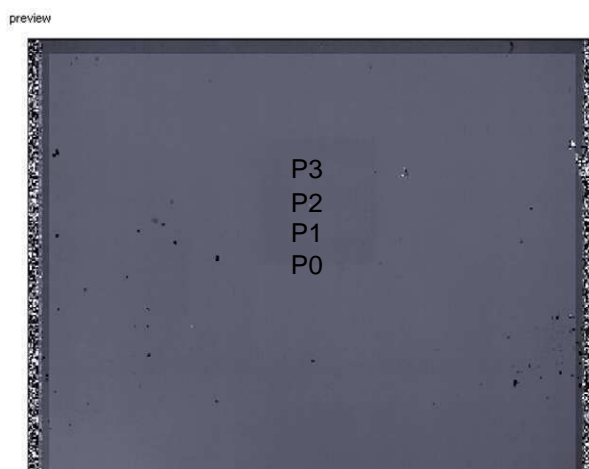
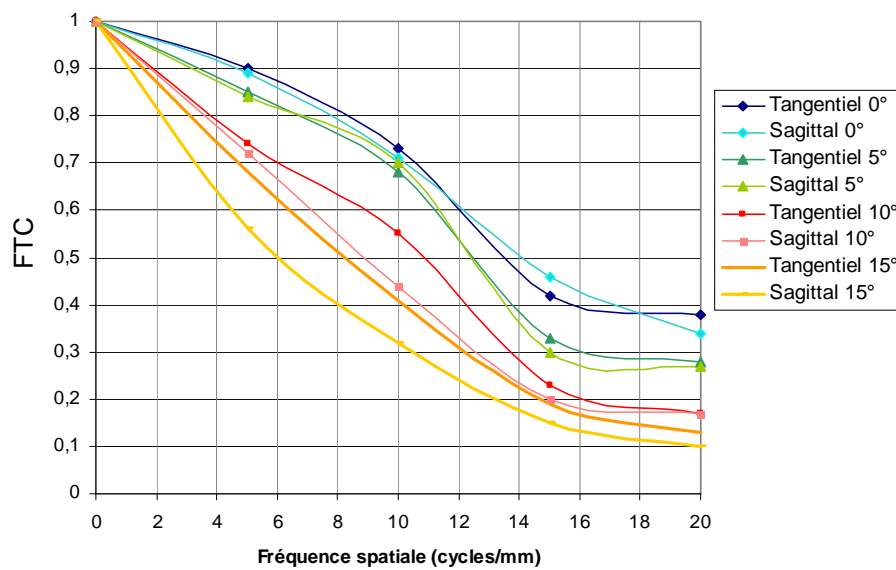


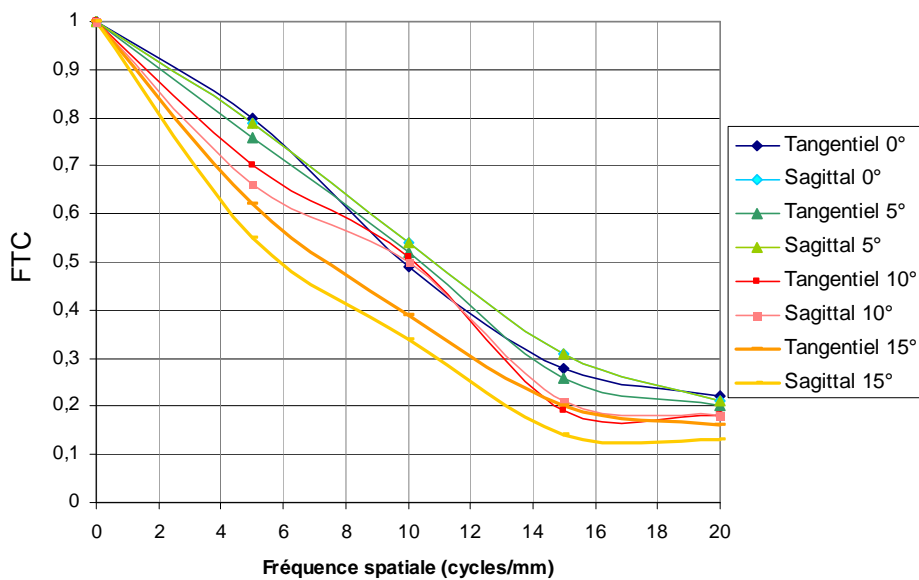
Figure D-51: Les différentes positions de la mire

Les angles de l'expérience sont plus faibles que le champ total du système ; en effet, la perte de contraste de l'image lorsque le champ augmente n'a pas permis de faire des relevés sur un angle hors axe en périphérie de la matrice. Le demi-champ balayé est de 15° . Néanmoins, les résultats obtenus au cours de ces expériences permettent de mettre en évidence l'avantage de la courbure et la qualité optique obtenue avec une seule lentille et un capteur plan.

Les résultats de la fonction de transfert de contraste sont présentés dans la Figure D-52.



A : Système plan



B : Système courbé

Figure D-52 : Courbes de FTC expérimentales

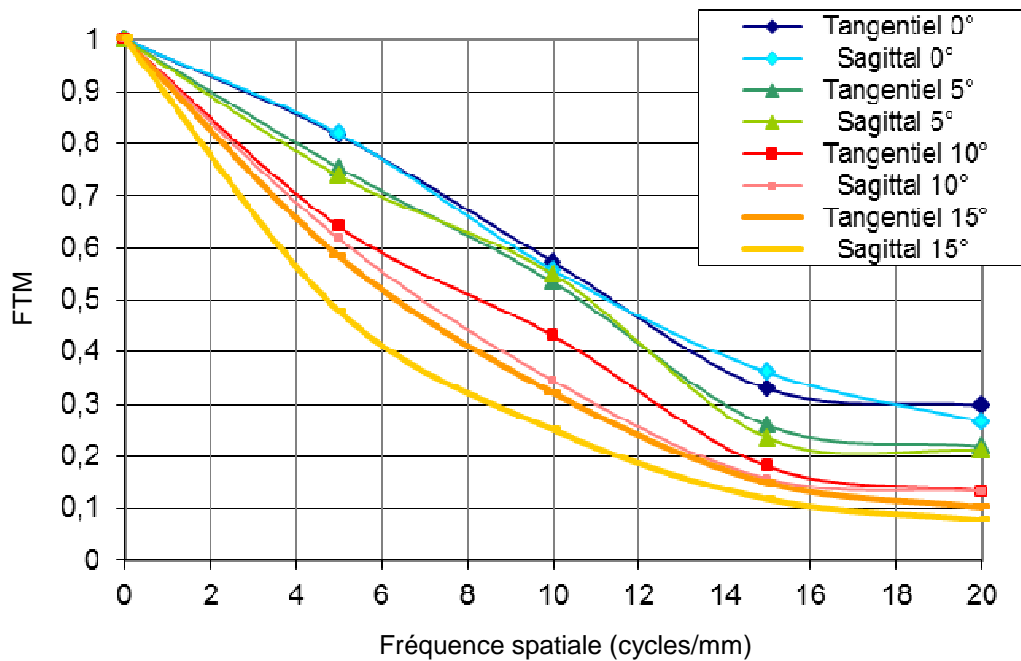
Ces courbes de contraste font apparaître l'avantage de la courbure des détecteurs. Le détecteur courbé présente une meilleure uniformité de réponse. L'écart de réponse pour le capteur plan varie entre un minimum de 14,5 % et un maximum de 41,5 % alors que le capteur courbé a une variation plus faible, entre 9 % et 25 %.

D.III.3.3 - Comparaison des résultats avec la théorie

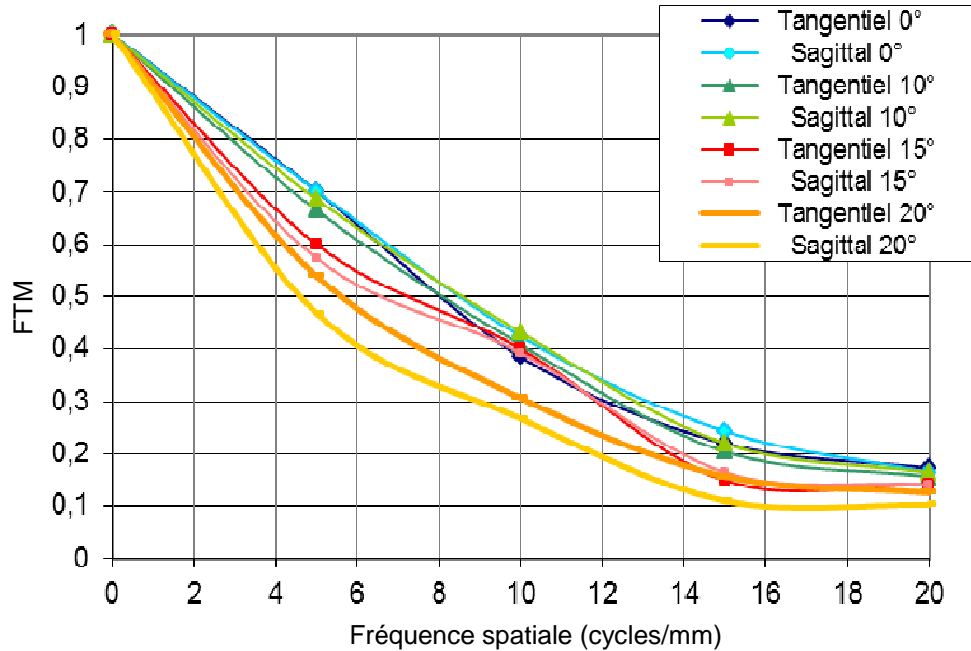
Les résultats expérimentaux seront comparés avec la théorie, selon la procédure utilisée pour le doublet de lentilles. Ainsi, les courbes expérimentales sont traduites en FTM, et les courbes théoriques sont multipliés par le sinus cardinal ce qui permet de prendre en compte la FTM du détecteur.

D.III.3.3.1 - Courbes FTM expérimentales

La traduction de ces courbes FTC en FTM est mise dans la Figure D-53.



A : Système plan



B : Système courbé

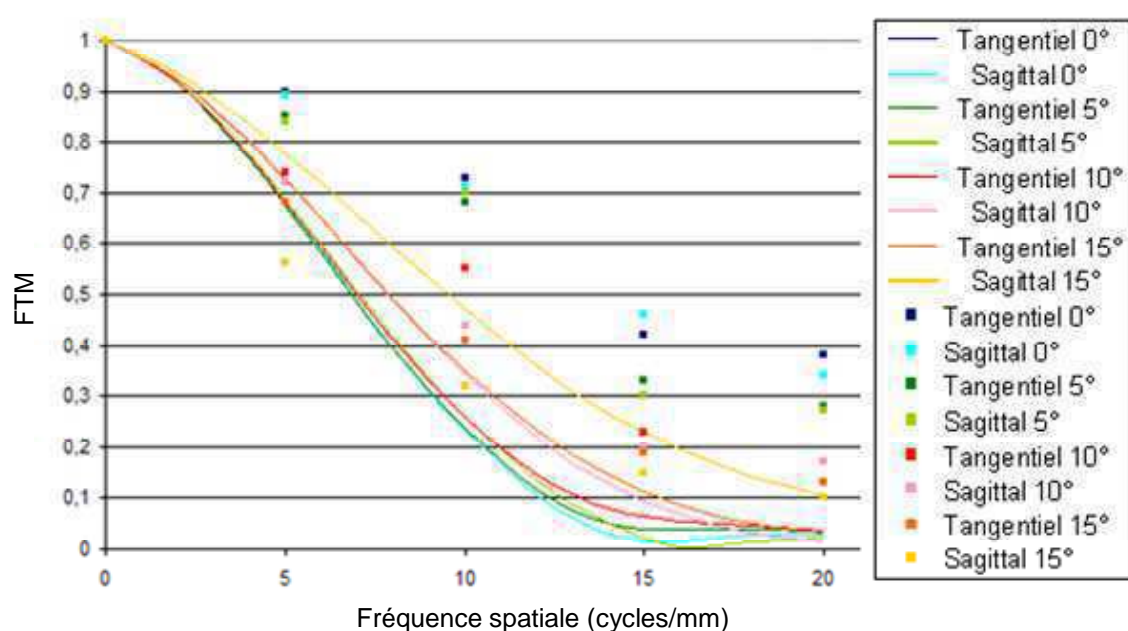
Figure D-53 : Courbes FTM expérimentales

L'écart entre la FTC et la FTM montre une petite baisse de modulation ; pour le système plan, la FTC varie entre 0,4 et 0,1 et la FTM décroît entre 0,3 et 0,1 à la fréquence de Nyquist (20

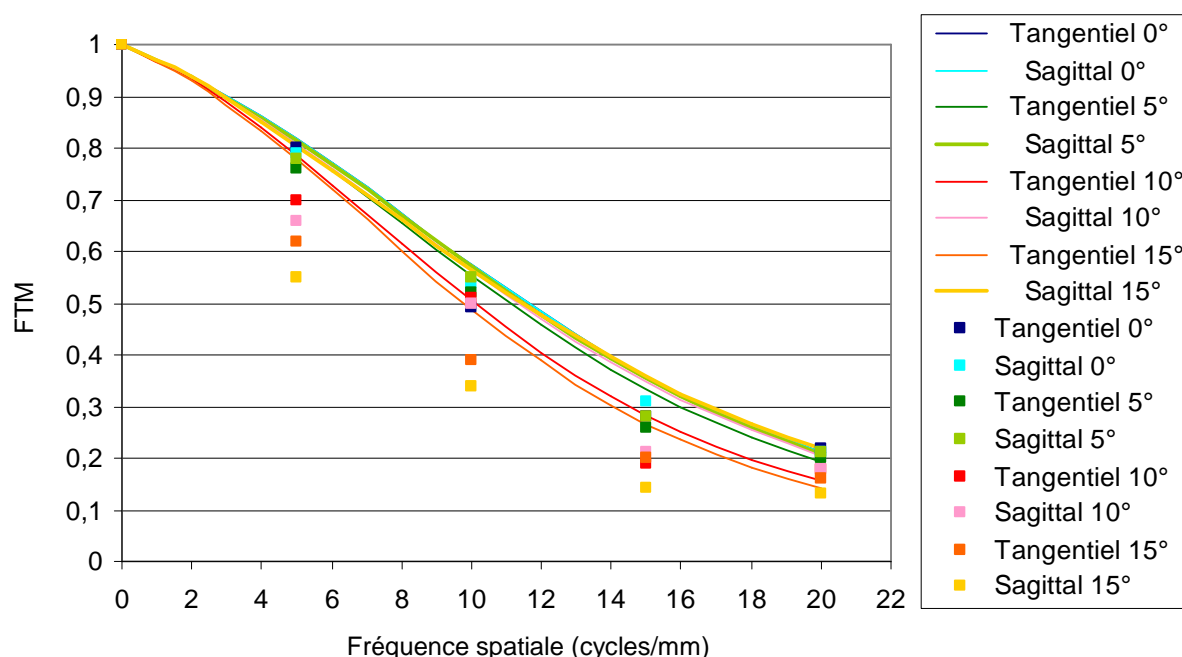
cycles/mm). Le système courbe a une FTM qui diminue de 5 %. Ces courbes FTM suivent une même dynamique ; la dispersion des FTM montre un écart de réponse plus grand pour le système plan (dispersion entre 2 % et 34 %), alors que le système courbé a un écart entre 7 % et 23 %.

La comparaison entre ces résultats expérimentaux et la théorie est décrite dans le paragraphe suivant. Les deux FTM, théoriques et expérimentales, sont placées sur un même graphique dans la Figure D-54.

Les courbes pleines sont les courbes théoriques obtenues par les simulations avec le logiciel Zemax, en prenant en compte la FTM du détecteur. Ce calcul a été présenté avec le doublet de lentilles ; la FTM théorique de Zemax est multipliée par le sinus cardinal au pas pixel. Cette opération augmente la perte de modulation, notamment aux basses fréquences, en comparaison avec les graphes de la Figure D-50. Les points ponctuels sur le graphe sont les valeurs obtenues par les mesures expérimentales, aux fréquences spatiales de 5, 10, 15 et 20 cycles/mm. Ces deux courbes permettent de comparer la réponse expérimentale avec la théorie et d'en évaluer l'écart.



A : Système plan



B : Système courbé

Figure D-54 : Comparaison des FTM expérimentaux (avec les carrés) et théoriques (avec les lignes)

Dans les deux systèmes plan et courbé, les FTM expérimentales, montrent un écart relativement important avec les courbes théoriques. La courbe expérimentale obtenue avec un système plan est meilleure que le tracé théorique prévu ; la perte de modulation est moins importante mais la réponse est plus étalée dans le champ. Au contraire, le système courbe a une réponse qui s'approche de la théorie mais la dispersion est également plus étalée.

En effet nous constatons que dans le système plan, les courbes expérimentales présentent une chute de la modulation en dessous de 20 % pour des fréquences de 15 cycles/mm, pour atteindre des valeurs entre 40 % et 10 % à la fréquence de Nyquist ; alors que, pour les courbes théoriques, la perte de modulation de 20 % apparaît à 10 cycles/mm pour finir à un contraste nul. La réponse expérimentale est également plus dispersée que la réponse théorique. La variation maximale est entre 30 % et 40 % alors que la théorie prévoit un écart entre 20 % et 35 %.

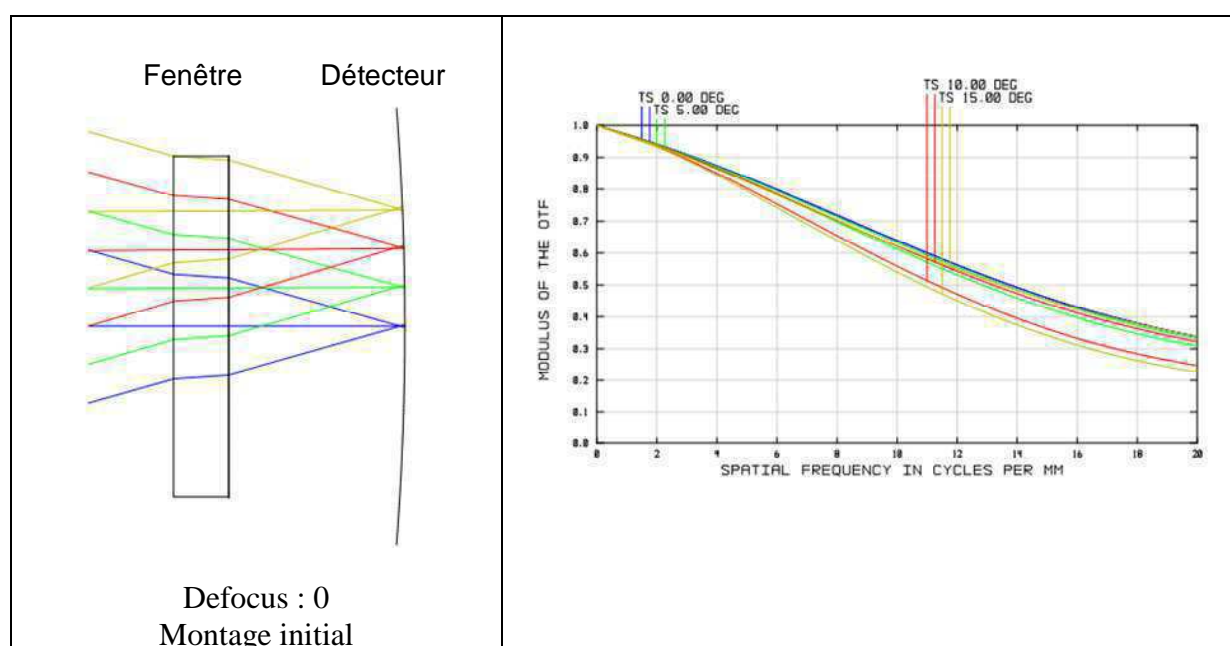
La fonction de transfert de modulation du système courbé chute en dessous de 20 % pour une fréquence de 14 cycles/mm alors que la théorie prévoit une fréquence de 17 cycles/mm. La réponse du détecteur courbé est, par contre, plus dispersée que la théorie ; l'écart de réponse se situe entre un minimum de 1 % et un maximum de 9 % alors que dans l'expérience, la variation est de 7 % à 23 %. Néanmoins, la variation de la réponse dans le champ reste inférieure à celle du détecteur plan. Ces graphes montrent bien l'uniformité de réponse obtenue grâce à la courbure du détecteur.

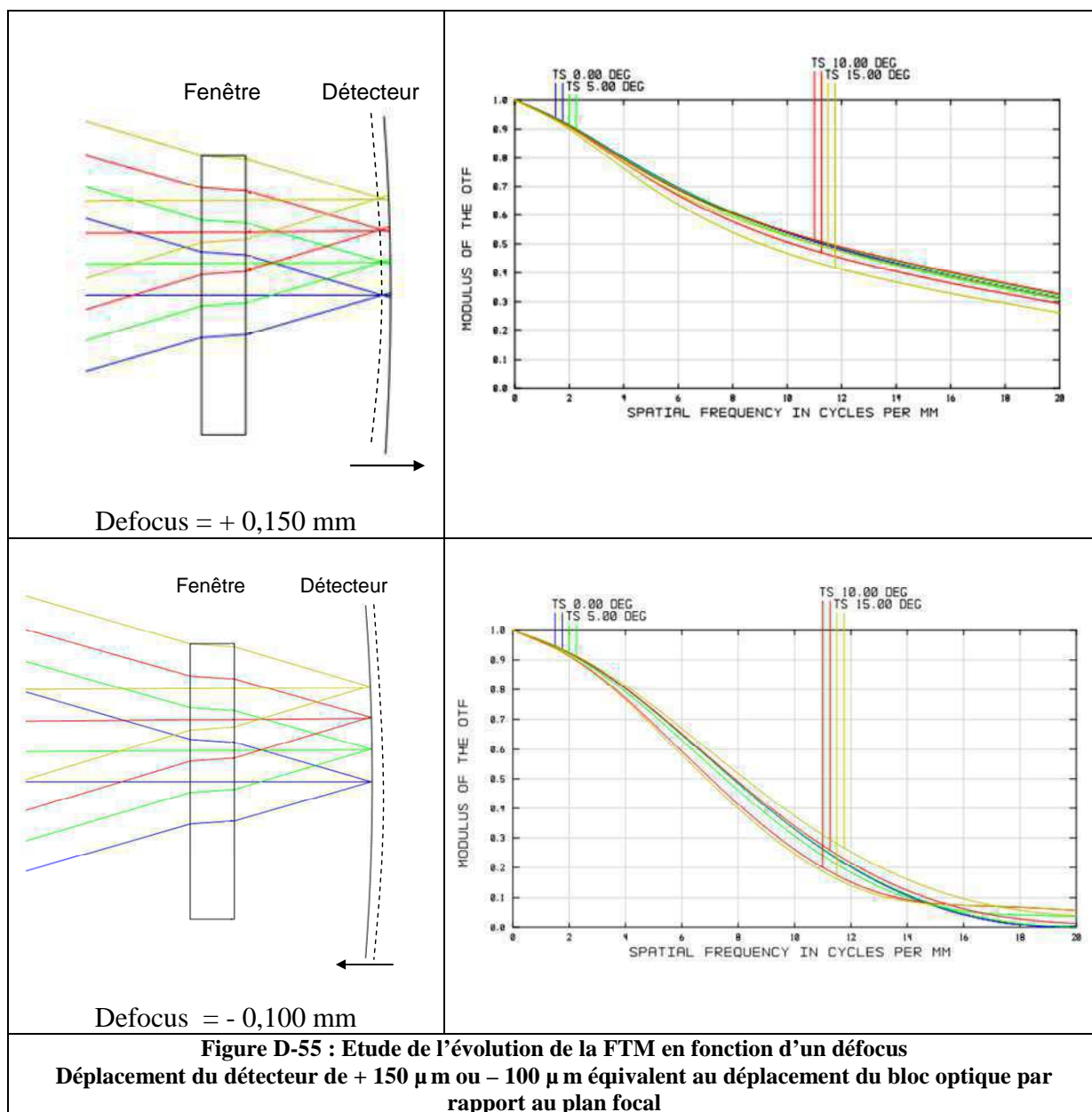
D.III.3.3.2 - Commentaires sur les résultats

Ces écarts entre l'expérience et la théorie sont fortement liés aux écarts de positionnement du système optique. La tolérance sur le système mécanique est trop importante, eu égard à celle nécessitée par le montage pour obtenir la qualité optique prévue dans la théorie.

En effet, le montage expérimental est délicat à réaliser du fait de certaines côtes mal déterminées liées au procédé expérimental. En particulier, la distance entre le bolomètre et la fenêtre doit être fixée à 4,78 mm du fait de la hauteur du capot ; cependant cette distance est liée à la hauteur du verre support. Compte tenu de la technique d'amincissement (polissage à sec), l'épaisseur finale est obtenue avec une précision maximale de 100 μm , qui se répercute donc sur le positionnement du détecteur par rapport à la fenêtre du capot. De même l'épaisseur de colle peut varier lors des différents reports (bolomètre sur céramique et céramique sur module à effet Peltier). Ces deux conditions expérimentales peuvent créer un écart d'une centaine de microns. De plus, les lentilles sont alignées par un faisceau auto collimateur, qui a une précision de 30 μm . Avec ces paramètres, la position des lentilles présente un écart avec les distances théoriques, et cet écart dégrade la qualité optique. L'ajustement des positions par le réglage mécanique prévu permet de diminuer ces effets, mais le réglage étant visuel et l'image moins nette qu'avec deux lentilles, il n'est pas optimum et la perte de qualité s'observe sur les résultats expérimentaux.

L'influence du positionnement du bloc optique sur la qualité optique peut être facilement mise en évidence par une étude spécifique avec le logiciel Zemax. La Figure D-55 étudie l'évolution de la qualité optique évaluée par les courbes de FTM, lorsque le bloc optique est écarté de 150 μm ou rapproché de 100 μm par rapport à la rétine courbe.





Lorsque le défocus augmente dans le sens positif, c'est-à-dire que le système optique s'éloigne du détecteur, la réponse est plus creusée mais la modulation à la fréquence de Nyquist n'est pas trop dégradée. La chute de modulation apparaît pour des fréquences plus basses. Dans l'exemple d'un défocus de $+0,150 \text{ mm}$, la FTM à 6 cycles/mm atteint $0,6$ et reste à $0,3$ à la fréquence de Nyquist, ce qui, après traitement avec la FTM détecteur, doit atteindre $0,5$ pour 6 cycles/mm et $0,2$ à la fréquence de 20 cycles/mm : ces valeurs sont celles obtenues expérimentalement.

Au contraire, lorsque le défocus est négatif, donc lorsque le système optique se rapproche du détecteur, la FTM se dégrade beaucoup trop. La chute intervient à des fréquences comparables au montage initial, mais avec une perte de modulation plus importante. Dans l'exemple présenté à $-0,100 \text{ mm}$, la FTM chute en dessous de $0,2$ pour une fréquence de 11 cycles/mm , et atteint une modulation nulle très rapidement. Au contraire, dans l'expérience, la FTM ne chute en dessous de $0,20$ que pour des plus hautes fréquences, et reste supérieure à $0,10$.

Il semble donc d'après cette étude, que l'expérience ait été réalisée avec un défocus d'environ + 150 μm .

Œil infrarouge

Malgré les difficultés expérimentales liées au montage et aux réglages, les résultats obtenus ont mis en évidence l'avantage de courber une rétine. Le gain dans l'uniformité de réponse apparaît clairement. La FTM de l'œil infrarouge est certes plus dégradée que le système à deux lentilles, mais elle présente, cependant, un ensemble optique viable et performant en comparaison de son encombrement et de sa complexité.

Conclusion du quatrième chapitre

Ce chapitre constitue le point final d'une aventure de trois ans dont l'origine remonte à l'étude matériau pour aboutir à un prototype de caméras infrarouge avec une qualité image suffisante pour reconnaître une personne et distinguer des détails. Ces systèmes étant nouveaux, tout l'environnement de test électro-optique a dû être ajusté progressivement aux composants. Les retours d'expériences ont été technologiques mais aussi mécaniques et optiques. Une nouvelle enceinte sous vide a été réalisée, des architectures optiques ont été conçues, l'intégration des lentilles a été adaptée aux tailles des systèmes, et enfin le banc de FTM a également dû être modifié.

Deux systèmes optiques ont été développés. Le premier est une caméra à deux lentilles sphériques du commerce ; ces systèmes ont été optimisés pour le détecteur plan et le détecteur courbe. Leur étude a permis de comparer la qualité optique de chacun d'eux et de mettre en évidence les avantages à courber le plan focal. Le deuxième système étudié est un prototype original qui s'inspire de l'œil humain. Ce système très simple, composé d'une seule lentille, a permis de montrer les avantages apportés par le détecteur courbe dans des systèmes très miniatures.

CONCLUSION

Ce travail de thèse a été consacré à la courbure sphérique de détecteurs infrarouge à des fins de simplification et de miniaturisation des caméras.

Deux méthodes, que l'on peut qualifier de bio-inspirées, ont été étudiées. En effet, dans la nature, aucun système de vision n'est plan. Soit la rétine est concave (œil humain), soit elle est convexe (œil d'insectes et crustacés). Ces deux architectures ont été réalisées au cours de la thèse, offrant deux solutions de miniaturisation différentes, qui ont été illustrées au travers d'études théoriques et d'applications concrètes.

Les systèmes optiques grand champ sont classiquement fortement affectés par l'aberration de courbure de champ ; plutôt que de chercher à la compenser, nous avons suivi ici la voie ouverte par Schmidt, choisissant de s'en accommoder en courbant le plan focal. Le gain optique est important : meilleure résolution angulaire, réponse impulsionnelle homogène dans l'axe et hors axe, meilleure uniformité de l'éclairement sur le plan focal. De plus, la conception optique est considérablement allégée. Les lentilles asphériques peuvent être supprimées (gain volumique) ou remplacées par des sphériques (simplification de conception) et le nombre d'ouverture peut être diminué avec une résolution constante.

La courbure convexe offre, quant à elle, le verrou technologique manquant actuellement aux systèmes bio-inspirés de la vision des yeux d'insectes, permettant ainsi une miniaturisation et une meilleure qualité optique. Cette solution consiste à sous-diviser le champ en plus petits angles de vue ; la scène est alors imagée par une matrice de lentilles sur un ensemble de photorécepteurs formant la matrice de détection. Cette solution, en rupture avec l'architecture optique traditionnelle, nécessite la courbure convexe des deux matrices (lentilles et détecteur).

L'originalité de mon travail a porté sur la mise en forme sphérique de composants monocristallins et monolithiques dont la surface active n'est pas modifiée. Cette solution de courbure pleine puce permet de travailler avec des composants sur étagère et elle s'intègre parfaitement au processus de fabrication standard.

Le procédé que j'ai développé se base sur l'amincissement à 50 μm des composants, qui sont ensuite courbés sur un support hémisphérique en appliquant une pression au moyen d'un outil dédié. Ces composants courbés sont ensuite mis en boîtier à l'instar des détecteurs standards pour former un imageur fonctionnel.

L'étape d'amincissement permet de diminuer la contrainte liée à la courbure. La déformation nécessaire est alors inférieure à la limite de rupture des matériaux de la microélectronique et plus particulièrement à celle du silicium, qui a été le véhicule de développement du procédé et le principal constituant des imageurs infrarouge.

Le même procédé est utilisé pour courber en concave et en convexe les composants. Les résultats expérimentaux montrent que l'échantillon de silicium courbé en convexe se déforme en créant des pliures sur les extrémités des médianes ; au contraire la courbure concave est parfaitement sphérique.

Cette différence de comportement dans les deux configurations concave et convexe a été vérifiée par la simulation par éléments finis. Elle s'explique par une dissimilitude des conditions aux limites du procédé. En effet en configuration convexe, la périphérie est libre de former des pliures puisqu'elle n'est pas contrainte par le support. Au contraire, en configuration concave, la périphérie est bloquée par le verre support. La modification du procédé de courbure en convexe serait intéressante à réaliser afin d'obtenir une courbure sphérique parfaite. Les leviers technologiques, qui me semblent jouer un rôle dans cette adaptation, sont la forme de l'outil, qui permet de modifier les points d'appuis, et la pression appliquée. La suppression des pliures en convexe semble possible, considérant les bons résultats obtenus sur le concave.

La caractérisation des résultats de courbure a permis de définir des critères de réussite qui sont principalement déterminés par la caractérisation de la surface des écarts à la sphère ; quatre facteurs sont analysés.

Le premier est le rayon de la surface parfaitement sphérique déduite de l'analyse brute de la surface courbée. Une bonne courbure est obtenue pour un écart entre les rayons parfait de l'échantillon et du support inférieur à 1 mm (sphère parfaite). Les défauts de la surface brute par rapport à cette sphère parfaite sont qualifiés par deux paramètres : le nombre de pliures que nous souhaitons égal à zéro, et le rayon de la surface réelle qui doit être égal à celui de la sphère parfaite. Un écart de 2 % peut être accepté dans la gamme de rayons visés afin d'obtenir un écart à la sphère parfaite de $\pm 5 \mu\text{m}$, qui est compatible avec le défaut de planéité accepté de ces systèmes (équivalence avec leur profondeur de champ) Enfin, l'évaluation de l'aire parfaitement sphérique permet de déterminer l'adéquation de la courbure réalisée avec le type de détecteur, l'objectif étant qu'au minimum l'ensemble de la surface sensible soit sphérique.

Ces critères de réussite ont été approchés grâce à une optimisation du procédé de courbure et un contrôle de ses paramètres (alignement de la pression exercée et type de colle). L'étude a notamment montré que l'outil de courbure devait être adapté aux échantillons par sa forme et ses dimensions. Ainsi, les amplitudes des pliures ont été diminuées en convexe et l'écart au rayon du verre support a été réduit. L'outil de courbure est un paramètre important dont un meilleur ajustement peut permettre d'obtenir des résultats plus proches encore des critères précédemment définis.

Le procédé a ensuite été transféré aux circuits fonctionnels ; tout d'abord le circuit de lecture, qui est commun aux deux types de détecteurs infrarouge, puis les bolomètres qui ont permis la réalisation de caméras fonctionnelles.

Mécaniquement, les résultats obtenus sur les circuits sont similaires à l'étude du silicium. En particulier, la configuration convexe présente des pliures qui sont absentes en concave. Néanmoins, les amplitudes sont plus importantes et les rayons accessibles (70 mm) sont plus importants que dans l'étude silicium (38 mm). Etant donné la différence structurelle entre ces deux composants, ces résultats sont très convenables ! En effet, le circuit est constitué d'une couche active de quelques microns (isolant et métal) dont les propriétés mécaniques modifient le comportement général du détecteur lors de la courbure. Et de plus, la technique d'amincissement diffère : les circuits sont amincis unitairement et ne bénéficient pas des

solutions de déstressage utilisées sur les siliciums de l'étude matériau. Ainsi, la limite de rupture des circuits est abaissée ce qui a pour effet de fragiliser le circuit, complexifiant les étapes de câblage et de libération des bolomètres et diminuant le rayon de courbure critique évalué à ce jour. L'avenir se porte donc sur un amincissement collectif avec déstressage des détecteurs. Cette seule modification dans le procédé de courbure permettrait de standardiser les composants utilisés (même quantité de défauts cristallins pour la série de détecteurs), de diminuer le rayon de courbure obtenu et de s'approcher d'un procédé industriellement viable.

L'effort pour industrialiser mon procédé de courbure semble raisonnable. En effet, l'amincissement est une étape connue dans la microélectronique et peut être réalisé collectivement. La courbure, en elle-même, peut être obtenue industriellement en adaptant le mode d'application de la force. J'ai ainsi mené des premiers tests en utilisant une machine d'hybridation pour positionner l'échantillon sur le support et appliquer la pression de manière indépendante de l'opérateur. Le transfert du procédé semble réalisable mais ces expériences méritent d'être poursuivies afin de contrôler la pression appliquée au travers de l'outil.

Considérant les bons résultats obtenus sur la courbure concave, je me suis principalement consacrée à cette configuration qui concerne la vaste problématique de la correction d'aberration de courbure de champ. L'analyse du comportement électrique a été menée sur les deux circuits, CMOS et bolomètre, après chaque étape du procédé : l'amincissement et la courbure.

J'ai démontré que, ni l'étape d'amincissement en unitaire, ni l'étape de courbure n'ont dégradé électriquement le comportement du circuit CMOS, le bruit mesuré, notamment, n'est pas modifié. Cette validation a permis d'envisager la courbure des bolomètres. Fabriqué sur un Si-CMOS, ce détecteur est fragile du fait de sa structure ; les pixels sont des membranes de silicium amorphes suspendues au dessus du circuit ; la cavité $\lambda/4$ ainsi formée est garante de la sensibilité au rayonnement infrarouge dans la gamme $8\ \mu\text{m} - 12\ \mu\text{m}$. Cette architecture aurait pu être sensible à la courbure, mais j'ai pu démontrer que la sensibilité des pixels au rayonnement est conservée et que le circuit de lecture n'est pas dégradé électriquement.

L'analyse électrique a démontré l'existence de deux rayons critiques de courbure. Notamment le circuit Si-CMOS peut être courbé en concave mécaniquement jusqu'à des rayons de 58 mm alors qu'il ne sera fonctionnel que pour des rayons de 69 mm. Cette distinction, doit certes être étoffée dans une statistique plus importante, néanmoins il me semblerait intéressant d'étudier plus en détail les composants non fonctionnels électriquement. Cette étude permettrait de déterminer les zones fragiles du circuit qui, non visibles à l'œil nu, sont dégradées électriquement. Les conclusions de cette analyse permettraient de reboucler sur le procédé de courbure afin de l'optimiser au mieux.

Cette étude électrique a également mis en évidence que le support de courbure choisi pour l'étude matériau n'était pas adapté. En effet, l'épaisseur de verre utilisée pour la courbure complexifie l'échange thermique entre le module à effet Peltier et le détecteur. Cette difficulté apparaît lors de la libération (bolomètre) et la caractérisation électro-optique. Une perspective intéressante pour les prochains prototypes consisterait à utiliser une céramique avec une empreinte sphérique, qui est réalisable dans l'industrie (Microcertec S.A.S. 2011). Outre l'aspect thermique, ce support serait mieux contrôlé dans son rayon de courbure ce qui permettrait un meilleur résultat de courbure des composants.

Ces travaux ont abouti à la réalisation de deux systèmes optiques. Profitant de l'avantage de miniaturisation qu'offre la courbure du détecteur, deux systèmes bio-inspirés ont été réalisés. Le premier est une caméra simple par sa conception qui est constituée de deux lentilles du commerce. Cette architecture a permis de comparer un système traditionnel avec un détecteur plan et une caméra « nouvelle génération » avec plan focal courbé. L'avantage optique de la courbure, notamment l'uniformité de la réponse impulsionnelle, a été démontré grâce aux mesures expérimentales de la fonction de transfert de contrastes (FTC).

Enfin, pour illustrer le potentiel de miniaturisation apporté par le détecteur courbe, j'ai réalisé un œil infrarouge de type « œil humain » avec une seule lentille et un bolomètre courbé en concave. La qualité des images obtenues ainsi que la FTC mesurée ont démontré le même potentiel : meilleure uniformité de réponse et meilleure résolution.

Les résultats ont montré un écart avec la théorie qui peut en partie s'expliquer par les conditions expérimentales et notamment la difficulté de réglage du système optique. Pour une caractérisation FTM plus précise, le montage optique pourrait être amélioré en fixant les distances entre lentilles par une entretoise et le réglage devrait être effectué par translation et non par rotation des tubes optiques. Enfin, une caractérisation complète comprenant la mesure de la PSF (fonction d'étalement du point) et une mesure de la FTM par une autre technique (bord de plage), permettrait de conclure plus précisément sur le potentiel optique du détecteur courbe. Ces caractérisations seront menées au sein de l'ONERA prochainement.

La deuxième application des détecteurs courbés est la réalisation d'un œil d'insecte, qui nécessite une rétine fortement courbée en convexe. L'architecture des détecteurs infrarouge refroidis favorise la réalisation de la structure « œil d'insecte ». En effet, ils sont composés d'une matrice de pixels fabriquée sur le semi-conducteur ternaire CdHgTe. Ce circuit de détection est hybridé sur le circuit de lecture Si-CMOS, et peut être modifié afin de former les groupes de pixels sensibles (structure en ommatidie de l'insecte). La courbure de la rétine est obtenue par la courbure conjointe des deux circuits.

Avant d'envisager la courbure sphérique de l'imageur hybridé, le circuit de détection a été structuré en groupes de pixels afin de former l'architecture de l'œil d'insecte et de faciliter la courbure à de faibles rayons. Un important travail de conception a donc été réalisé afin de reproduire la structure multi-pupillaire des insectes. Pour cela, j'ai modifié technologiquement le circuit de détection en CdHgTe, pour créer des groupes de 64x64 pixels qui forment ainsi des mini-matrices interconnectées par des liaisons métalliques. L'amincissement du substrat permet de dissocier ces sous-éléments qui ne sont alors liés que par ces interconnexions souples d'or. J'ai réalisé différentes variantes de cette structure ; je les ai ensuite hybridées sur les circuits de lecture et caractérisées selon la procédure standard. Les matrices obtenues sont électriquement fonctionnelles. Un premier objectif de mon travail, à savoir la validation de la technologie du détecteur, a donc été atteint.

Les perspectives de la structure « œil d'insecte » consistent à courber conjointement les deux circuits. Suite aux résultats électriques plans, la courbure de l'ensemble peut être réalisée en utilisant d'une part le savoir faire d'amincissement développé dans un projet antérieur au laboratoire, et d'autre part le procédé de courbure que j'ai développé.

Les résultats de courbure obtenus sur le circuit Si-CMOS ont montré le potentiel en convexe : des rayons de 50 mm ont été obtenus mécaniquement. Les tests électriques n'ont pu

être menés à bien étant donné mon manque de retour d'expérience à ce moment là sur la gestion des pliures lors du câblage. Les amplitudes de ces pliures pouvant être diminuées et une solution facilitant le câblage ayant été trouvée (comblement des pliures), cette étude électrique pourrait être réalisée et démontrerait un comportement similaire aux circuits courbés en concave.

La courbure du circuit de détection est, quant à elle, mécaniquement favorisée par la structure en îles de matériaux. En effet le semi-conducteur CdHgTe est sensible aux contraintes appliquées (thermique, mécanique...) qui peuvent modifier son équilibre stoechiométrique et ainsi dégrader le niveau de dopage. Cependant, cette organisation permet de déporter la contrainte sur les interconnexions qui se déforment tandis que les surfaces actives (ici les mini-matrices) sont très faiblement courbées. En effet, pour une application militaire, la courbure à un rayon de 40 mm nécessite de déformer le groupe sous une flèche de 8 μm . Cette faible dimension, cumulée à une épaisseur encore plus fine que celle du bolomètre, me laisse penser que la courbure ne dégraderait pas le matériau. La courbure globale du composant peut donc atteindre de faibles rayons sans modifier notablement le comportement électrique.

La conservation du câblage constitue un avantage de la structure hybridée des détecteurs refroidis. En effet, contrairement à l'état de l'art, où chaque groupe de pixels doit par la suite être connecté, l'hybridation de ces mini-matrices avec le circuit de lecture est conservée. De plus, étant donné que le circuit CMOS n'est pas modifié, l'ensemble peut être intégré dans la procédure standard. Ainsi, une caméra de type œil d'insecte pourrait être fabriquée et permettrait d'évaluer le gain de cette nouvelle architecture, ouvrant la voie aux travaux de biomimétisme.

Ce mémoire de thèse a présenté le travail accompli sur la courbure de détecteurs infrarouge. Parti du concept et du défi scientifique de courber des composants fonctionnels sans modifier leurs structures, les résultats ont dépassé la simple évaluation de faisabilité technologique. Les rencontres avec des concepteurs optiques et des systémiers ont montré le potentiel que présente cette nouvelle génération de détecteurs. Cette thèse ne s'arrête donc pas à ces quelques conclusions et aux perspectives techniques développées. Les enjeux de ces travaux sont bien plus larges.

L'intérêt de la courbure du plan focal a été démontré au cours de ma thèse sur trois champs d'application : analyse spectrale, astronomie, militaire. Dans ces trois domaines, la courbure du plan focal permet de corriger l'aberration de courbure de champ ; son influence permet une amélioration de la qualité optique mais également selon les applications, une simplification ou une miniaturisation de l'architecture. Les spectromètres intégrés que j'ai étudiés nécessitent de faible courbure principalement cylindrique. Cependant, un plan focal sphérique permet d'envisager de nouvelles architectures. Par exemple, des analyses spectrales de sources différentes pourraient être menées en parallèle sur le même détecteur (Figure 1).

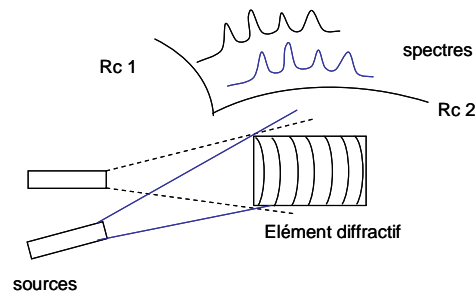


Figure 1 : Spectromètre inspiré des travaux d'Avrutsky et al (Avrutsky et al. 2006)

Dans le domaine de l'astronomie, les instruments évoluent vers un élargissement du champ et une augmentation de l'ouverture des systèmes. La correction de l'aberration de courbure de champ est donc primordiale pour ces futurs appareils systèmes. L'étude des deux instruments CODEX et OPTIMOS EVE ont montré le formidable gain optique obtenu par la seule courbure du plan focal. Ce domaine est celui qui profiterait le plus des avantages offerts par cette variable de conception. En effet, elle lève un verrou technologique sur ces instruments volumineux et complexes ; le système optique est considérablement allégé et le gain en coût et en poids est important.

Cependant, l'accès à ce domaine nécessite la courbure de plans focaux de plus large format. La perspective majeure serait donc d'étendre l'étude matériau menée sur le silicium à de plus large taille de détecteurs avec pour objectif principal de déterminer une loi de comportement entre les rayons de courbure accessibles et la taille des composants. De prime abord, je pense que les résultats de courbure des grands formats seraient similaires aux petits échantillons s'ils sont courbés avec la même flèche. Par exemple, un échantillon de 10x10 mm² courbé à un rayon de 40 mm a une flèche de 312 μm et serait équivalent à un échantillon de 20x20 mm² courbé à un rayon de 160 mm. La courbure pleine puce des détecteurs infrarouge refroidis serait également une étape technologique à développer pour répondre à ces applications. Le procédé de courbure peut satisfaire ce besoin, cependant le comportement mécanique à la courbure de ce circuit de détection CdHgTe doit être évalué.

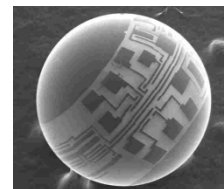
Ces résultats seraient également pertinents pour les applications militaires comme j'ai pu le faire avec les bolomètres. En effet l'utilisation de détecteurs courbés me semble une solution innovante et astucieuse pour répondre aux besoins de miniaturisation et d'augmentation de l'ouverture des systèmes de détection. Les trois applications militaires envisagées dans ma thèse démontrent ce potentiel. Les systèmes existants peuvent être optimisés par la courbure du détecteur (augmentation de la résolution, ouverture du système ou du champ) ; des systèmes simples, comme la chambre noire, peuvent être réalisés avec une meilleure qualité optique et un nombre limité de dioptries. Enfin, les travaux bio-inspirés profiteraient grandement du développement de rétines courbes qui est actuellement un des freins à un biomimétisme parfait. Cette voie de recherche est en expansion, offrant des architectures innovantes dont les applications peuvent être élargies au grand public.

La courbure sphérique est actuellement peu discuté dans l'état de l'art, cependant nous avons vu qu'elle adresse divers besoins des systèmes de détection. Profitant de l'évolution actuelle de la microélectronique vers la flexibilité des systèmes, la courbure sphérique des détecteurs me semble un atout prometteur pour les futures caméras.

Deux entreprises créées ces dernières années, illustrent cette évolution. L'équipe qui a réalisé la première caméra hémisphérique sur substrat souple, poursuit ces travaux en créant MC 10 (Huang 2011). Leur recherche s'applique à l'électronique souple et flexible (Figure 2) adressant le grand public avec la réalisation de circuits flexibles intégrés aux objets du quotidien, le médical avec la réalisation de cathéter flexible ou la sécurité – défense, avec notamment des caméras hémisphériques (mc10 2011). Les mêmes applications sont visées par l'entreprise Ball Semi (Ball Semiconductor, Inc 2011). Cette compagnie japonaise s'est spécialisée sur les composants sphériques, modifiant le procédé de fabrication des circuits afin de travailler directement sur un substrat sphérique. Des circuits de type MEMS ou radiofréquence sont fabriqués sur des billes de 1 mm à 8 mm de diamètres (Figure 3).



**Figure 2 : Domaines d'activités
MC 10**



**Figure 3 : Circuits sur une bille de 8 mm -
Ball Semi**

Enfin, je finirai sur la réalisation majeure de mes travaux de thèse : l'œil infrarouge. Ce système similaire à l'œil humain a montré une bonne résolution angulaire, uniforme dans le champ dans un volume minime. Cette réalisation est une première mondiale et pourrait être transférée sur diverses applications. Etant donné que le procédé de courbure intervient en fin de fabrication des détecteurs, les capteurs de toutes catégories pourraient être courbés. Notamment, les capteurs visibles CCD et CMOS, avec lesquels on pourrait créer des caméras de type « œil humain » visible. La similarité de ces systèmes de détection avec l'œil humain permettrait ainsi d'équiper les robots (Figure 4) ou les drones. Mais on pourrait également imaginer que la seule courbure du détecteur puisse remplacer les rétines humaines déficientes et offrir ainsi une solution aux recherches très amont sur l'œil bionique (Figure 5).

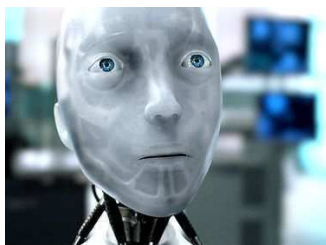


Figure 4 : Œil visible ou infrarouge sur les robots

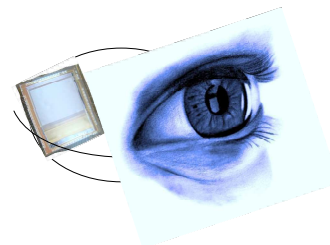


Figure 5 : Œil bionique, le futur ?

Références

Introduction

- Clark, M. R., D. M. McCann, et M. C. Forde. Juin 2003. Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. *NDT & E International* 36, no. 4 : 265-275.
- Dobigny, Valérie. Avril 2011. L'incendie dans l'oeil de la caméra, no. Dossier TECHNOLOGIES ET SÉCURITÉ, no. 472 : 17-19.
- Land, Michael F. Mai 2005. The optical structures of animal eyes. *Current Biology* 15, no. 9 R319-R323
- Schaller, R. R. Juin 1997. Moore's law: past, present and future. *IEEE Spectrum* 34, no. 6 : 52-59.
- Schreiner, K. Sept/Oct 1999. Night Vision: infrared takes to the road. *IEEE Computer Graphics and Applications* 19, no. 5 : 6-10.
- Yole Developpement. 2011. *Uncooled Infrared Imaging Market: commercial & military applications*.

Chapitre A : La courbure de détecteurs

- Avrutsky, Ivan et al., Octobre 2006. Concept of a miniature optical spectrometer using integrated optical and micro-optical components. *Applied Optics*, 45 no. 30 : p.7811-7817.
- Bacon, C.P., Mattley, Y. & DeFrece, R., 2004. Miniature spectroscopic instrumentation: Applications to biology and chemistry. *Review of Scientific Instruments*, 75, no. 1 : p.1.
- Balland, B., 2007. *Optique géométrique: imagerie et instruments*, PPUR presses polytechniques.
- de la Barriere, F. de la et al., Février 2011. Design strategies to simplify and miniaturize imaging systems. *Applied Optics*, 50 no. 6 : p.943-951.
- Brendel, T., Octobre 1958. Three membered photographic objective. Brevet 2854889
- Brisset, P., Août 2004. *Drones civils: perspectives et réalités*, Ecole Nationale de l'Aviation Civile.
- BROLL, N., Avril 1996. *Caracterisation de Solides Cristallises par Diffraction X*, Ed. Techniques Ingénieur P1080.

- Brun, A., 1953. L'idée géniale de B. Schmidt et ses conséquences pour les progrès de l'optique et de l'astronomie. *L'Astronomie*, 67, p.420.
- Brunner, R. et al., Julliet 2008. Microspectrometer based on holographically recorded diffractive elements using supplementary holograms. *Optics Express*, 16, no. 16 : p.12239..
- CFHT, 2010. Concept IMAKA final- rapport de faisabilité.
http://www.cfht.hawaii.edu/en/projects/IMAKA/Concept_IMAKA_Final_Feasibility_Report.20100411.pdf.
- Chaganti, K. et al., 2006. A simple miniature optical spectrometer with a planar waveguide grating coupler in combination with a plano-convex lens. *Opt. Express*, 14, no. 9 : p.4064–4072.
- CHARLOT, F. et al., Juin 2007. Le point sur la microanalyse X. *SPECTRA ANALYSE - Technologie appliquée*, no. 256 : p.22-43
- Chemla, F. et al., 2010. OPTIMOS-EVE design trade-off analysis. Dans Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III. San Diego, California, USA, p. 77355L-77355L-12.
- Cherokee, Octobre 2006. *Noct-Nikkor MF 58mm f/1.2 (Ai/Ai-S)*,
<http://www.pixelistes.com/forum/noct-nikkor-mf-58mm-f-1-2-ai-ai-s-t8906.html>.
- CNES, 2003. Les Débris Spatiaux.
http://www.cnes.fr/automne_modules_files/standard/public/p1778_29f459e686902cdebe327b2fd951577debris.pdf.
- CNES, 2011. Site web CNES sur les débris spatiaux. <http://debris-spatiaux.cnes.fr/>.
- Colbère, L., 1999. *Un siècle d'invention photographique. illustrations en noir et en couleur*, Vm Editions.
- Cortina, J. et al., 2009. Technical Performance of the MAGIC Telescopes. 0907.1211. :
<http://arxiv.org/abs/0907.1211>.
- Daukantas, P., 2007. Ground-Based Telescopes for the 21st Century. *Optics and Photonics News*, 18, no. 9 : p.28–34.
- Druart, G., Guérineau, N., et al., Juin 2009. Demonstration of an infrared microcamera inspired by *Xenos peckii* vision. *Applied Optics*, 48, no. 18 : p.3368-3374.
- Druart, G., Guérineau, N., et al., Février 2009. Compact infrared pinhole fisheye for wide field applications. *Applied Optics*, 48, no. 6 : p.1104-1113.
- Duparre, J. et al., 2004. Artificial Apposition Compound Eye Fabricated by Micro-Optics Technology. *Applied Optics*, 43, no. 22 : p.4303-4310..
- Duparré, J., Dannberg, P., et al., 2005. Thin compound-eye camera. *Applied Optics*, 44, no. 15 : p.2949.

- Duparré, J., Wippermann, F., et al., 2005. Chirped arrays of refractive ellipsoidal microlenses for aberration correction under oblique incidence. *Optics Express*, 13, no. 26 : p.10539..
- Franke, J.M., 1979. Field-widened pinhole camera. *Applied Optics*, 18, no. 17 : p.2913-2914.
- Geyl, R., Les combinaisons optiques à miroirs asphériques off axis.
- Gilmozzi, R. & Spyromilio, J., 2008. The 42 m European ELT: status. Dans *Proc. of SPIE* 7012 : p. 701219–1.
- Grabarnik, S. et al., 2009. Microspectrometer with a concave grating fabricated in a MEMS technology. *Procedia Chemistry*, 1, no. 1 : p.401-404.
- Grabarnik, Semen et al., 2008. Optimal implementation of a microspectrometer based on a single flat diffraction grating. *Applied Optics*, 47, no. 12 : p.2082.
- Grayson, T., 2002. *What was that? Where is it going? What is it doing?*, DARPA Tech Discours
- Hamanaka, K. & Koshi, H., 1996. An Artificial Compound Eye Using a Microlens Array and Its Application to Scale-Invariant Processing. *Optical Review*, 3, no. 4 : p.264-268..
- Hinton, J.A. & Collaboration, for the H., 2004. The Status of the H.E.S.S. Project. *astro-ph/0403052*. <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0403052>.
- Holst, G.C., 2008. *Electro-optical Imaging System Performance*, J C D Publishing.
- Hsu, T., Juillet 1982. Reflective wide-angle pinhole camera. *Applied Optics*, 21, no. 13 : p.2303-2304.
- IPMU, 2011. Subaru Telescope HSC Wide field corrector. <http://sumire.ipmu.jp/en/1648>.
- ISO 15529, 2010. Optique et photonique - Fonction de transfert optique - Principes de mesure de la fonction de transfert de modulation (MTF) des systèmes de formation d'image échantillonnés.
- Iwert, O. & Delabre, Bernard, 2010. The challenge of highly curved monolithic imaging detectors. Dans *High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy IV*. San Diego, California, USA, p. 774227-774227-9..
- Janz, S. et al., Février 2004. Planar waveguide echelle gratings in silica-on-silicon. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16, no. 2 : p.503-505.
- Jedicke, P. & Jedicke, R., Septembre 2008. The coming Giant Sky Patrols. *Sky & Telescope Magazine*, p.30-35.
- Kingslake, R., 1989. *A history of the photographic lens*, Academic Press.
- Kubacki, E., 2005. Aplanats and Achromats. , (20051128).<http://www.cvimellesgriot.com/products/Documents/aplanats-achromats.pdf>.
- Laporte, P., 2011. *Instrumentation sol en astronomie Versus Détecteurs courbes*, Observatoire de Paris à Meudon: Observatoire de Paris à Meudon.

- Larish, J., 1996. From Yesterday's Analog Electronic Still Photography to Today's Digital. *Optics and Photonics News*, 7, no. 10 : p.16–20.
- Li, Z. et al., 2009. Hybrid Nanoimprint–Soft Lithography with Sub-15 nm Resolution. *Nano Letters*, 9, no. 6 : p.2306-2310.
- Lindberg, D.C., 1968. The theory of pinhole images from antiquity to the thirteenth century. *Archive for History of Exact Sciences*, 5, no. 2 : p.154–176.
- Liske, J. et al., 2008. Cosmic dynamics in the era of Extremely Large Telescopes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 386 : p.1192-1218.
- Meinel, A.B., 1953. Aspheric Field Correctors for Large Telescopes. *The Astrophysical Journal*, 118 : p.335.
- Miyazaki, S. et al., 2002. Subaru Prime Focus Camera -- Suprime-Cam --. <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0211006>
- Mürsepp, P.V., 1968. Bernhard Schmidt, remarquable opticien du XXe siècle. *L'Astronomie*, 82, p.275.
- Newton, I., 1993. A new theory about light and colors. *American journal of physics*, 61, p.108–108.
- Pasquini, Luca et al., 2006. CODEX: measuring the acceleration of the universe and beyond. Dans *The Scientific Requirements for Extremely Large Telescopes*. p. 193-197. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2006IAUS.232 : p193-197>
- Petzval, J., 1975. *Bericht uber die Ergebnisse einiger dioptrischer Untersuchungen*, Akademiai Kiado. Ouvrage ISBN 9630502690
- Radtke, D., Stumpf, M. & Zeitner, U.D., 2010. Advances in lithography on non-planar surfaces. Dans *Micro-Optics 2010*. Brussels, Belgium : p77160Z-77160 <http://link.aip.org/link/PSISDG/v7716/i1/p77160Z/s1&Agg=doi>
- Rasmussen, F., Juin 2008. Nikon Noct-Nikkor 58mm f/1.2 AI-S Review. http://www.momentcorp.com/review/nikon_noct-nikkor_58mm.html.
- Rollin, J., 6 avril 2011. *Rétines courbes / combinaisons IRNR*, Thales Angénieux. Confidentiel
- Roquencourt, J., 1998. Daguerre et l'optique. *Études photographiques*, no. 5. <http://etudesphotographiques.revues.org/index164.html>.
- Sander, D. & Müller, J., 2001. Selffocussing phase transmission grating for an integrated optical microspectrometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 88, no. 1 : p.1-9.
- Schade, W., 16 May 1939. Lens System. Brevet US 2158202
- Schade, W., 13 February 1951. Objective of the Petzval type with high index collective lens element cemented to lower index dispersive element. Brevet 2541484

- Segelken, 1999. New to science, a novel insect eye could be a very old way of seeing. *Cornell News*.
- Smith, W.J., 4 Novembre 1966. OBJECTIVE OP THE PETZVAL TYPE WITH FIELD FLATTENER AND THREE OR MORE POSITIVE ELEMENTS. Brevet US3255664
- Smith, W., 2007. *Modern Optical Engineering, 4th Ed.* 4^e éd., McGraw-Hill Professional.
- Snow, S. & Jacobsen, S.C., Janvier 2007. Microfabrication processes on cylindrical substrates - Part II: Lithography and connections. *Microelectronic Engineering*, 84, no. 1 : p.11-20.
- Starr, B.M., 2002. LSST Instrument Concept. Dans *Proceedings of SPIE*. Survey and Other Telescope Technologies and Discoveries. Waikoloa, HI, USA, p. 228-239.
- Studiosport, 2011. Comparatif de caméras embarquées. <http://www.studiosport.fr/comparatif-camera-embarquee-studiosport.pdf>.
- Surrel, J., 1999. Les aberrations. *Optique et photonique*, no. 4.
- Swain, P., 2004. Curved CCD detector devices and arrays for multispectral astrophysical applications and terrestrial stereo panoramic cameras. Dans *Proceedings of SPIE*. Optical and Infrared Detectors for Astronomy. Glasgow, Scotland, United Kingdom, p. 281-301.
- Tanida, J. et al., 2001. Thin Observation Module by Bound Optics (TOMBO): Concept and Experimental Verification. *Applied Optics*, 40, no. 11 : p.1806-1813.
- Texereau, J., 29 Janvier 1955. Commission des instruments. *L'Astronomie*, 29, p.205.
- Thuresson, M. et al., 2005. Mechanical load and EMG activity in the neck induced by different head-worn equipment and neck postures. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35, no. 1 : p.13-18.
- Tisse, C.-L., 2005. Low-cost miniature wide-angle imaging for self-motion estimation. *Optics Express*, 13, no. 16 : p.6061-6072.
- Wetherell, W.B. & Rimmer, M.P., Décembre 1972. General Analysis of Aplanatic Cassegrain, Gregorian, and Schwarzschild Telescopes. *Applied Optics*, 11, no. 12 : p.2817-2832.
- Wolffenbuttel, R.F., 2004. State-of-the-Art in Integrated Optical Microspectrometers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 53, no. 1 : p.197-202.
- Wynne, C.G., 1974. A new wide-field triple lens paraboloid field corrector. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 167 : p.189–198.
- Wynne, C.G., Juillet 1967. Afocal Correctors for Paraboloidal Mirrors. *Applied Optics*, 6, no. 7 : p.1227-1231..
- Wynne, C.G., 1965. Field Correctors for Large Telescopes. *Applied Optics*, 4, no. 9 : p.1185-1192..

- Wynne, C.G., 1968. Ritchey-Chretien telescopes and extended field systems. *The Astrophysical Journal*, 152, p.675.
- WYNNE, C.G., 1969. Two-Mirror Anastigmats. *Journal of the Optical Society of America*, 59, no. 5 : p.572-578.
- Young, M., 1971. Pinhole Optics. *Applied Optics*, 10, no. 12 : p.2763-2767

Chapitre B : La physique de la courbure

- Alaca, B.E. et al., 2011. Strain-controlled bulge test. *Journal of Materials Research*, 23, no. 12 : p.3295-3302.
- Banchoff, T.F. & Lovett, S., 2010. *Differential Geometry of Curves and Surfaces*, A K Peters.
- Bonnotte, E. et al., 2011. Two interferometric methods for the mechanical characterization of thin films by bulging tests. Application to single crystal of silicon. *Journal of Materials Research*, 12, no. 09 : p.2234-2248.
- Bourchtein, A. & Bourchtein, L., 2006. Some problems of conformal mappings of spherical domains. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*, 58, no. 6 : p.926-939.
- Bourguignon, J.-P., 2003. La sphère sous toutes ses formes. , no. 41.Dossier pour la Science
- Brantley, W.A., 1973. Calculated elastic constants for stress problems associated with semiconductor devices. *Journal of Applied Physics*, 44, no. 1 : p.534.
- Bréchet, Y., 2005. Matériaux sur mesure dans les structures. *Bulletin de la SFP*, 150 : p.17.
- Brown, K.M., 2004. System in package the rebirth of SIP. *Custom Integrated Circuits Conference, 2004. Proceedings of the IEEE 2004*. Custom Integrated Circuits Conference, 2004. Proceedings of the IEEE 2004. IEEE : p. 681- 686.
- Chateauminois, A., 2008. Introduction à la tribologie: éléments de mécanique de contact. http://www.espci.fr/usr/chateau/COURS/tribologie/meca_contact.pdf.
- Chung, D.H. & Buessem, W.R., 1967. The Elastic Anisotropy of Crystals. *Journal of Applied Physics*, 38, no. 5 : p.2010-2012.
- CVI, 2011. Plano-convex spherical lenses. <https://cvmellesgriot.com/Products/Documents/Catalog/LPX.pdf>.
- Dinyari, R. et al., 2008. Curving monolithic silicon for nonplanar focal plane array applications. *Applied Physics Letters*, 92, no. 9 : p.091114.
- Disco, 1998. DIVISION WORK METHOD FOR SEMICONDUCTOR WAFER. Brevet 3464388
- Disco, 2005. METHOD FOR DICING SEMICONDUCTOR WAFER. Brevet 4427308

- Fendler, M. & Dumas, D., 2011. Process of manufacturing a curved circuit. Brevet EP2320469
- François, D., Pineau, A. & Zaoui, A., 1993. *Comportement mécanique des matériaux: Viscoplasticité, endommagement, mécanique de la rupture, mécanique du contact*, Hermès.
- Freund, L.B. & Suresh, S., 2004. *Thin Film Materials: Stress, Defect Formation and Surface Evolution*, Cambridge University Press.
- Gonzalez, M. et al., 2008. Design of metal interconnects for stretchable electronic circuits. *Microelectronics Reliability*, 48, no. 6 : p.825-832.
- Grove, A.S., 1967. *Physics and Technology of Semiconductor Devices* 1^{er} éd., Wiley.
- Hsu, P.I., 2004. Spherical deformation of compliant substrates with semiconductor device islands. *Journal of Applied Physics*, 95, no. 2 : p.705.
- Hsu, P.I. et al., 2002. Thin-film transistor circuits on large-area spherical surfaces. *Applied Physics Letters*, 81, no. 9 : p.1723.
- Hu, S.M., 1982. Critical stress in silicon brittle fracture, and effect of ion implantation and other surface treatments. *Journal of Applied Physics*, 53, no. 5 : p.3576.
- Hure, Jeremy, Roman, B. & Bico, J., 2010. Adhesion d'une plaque mince sur une sphere par capillarite. Dans LA 13e RENCONTRE DU NON LINÉAIRE. Ecole nationale supérieure de chimie de Paris,.
- Hure, Jérémy, Roman, B. & Bico, J., 2011. Wrapping an Adhesive Sphere with an Elastic Sheet. *Physical Review Letters*, 106, no. 17 : p.174301.
- Jochen Kothe & Jochen Kothe, 1878. Göttinger Digitalisierungszentrum: Seitenansicht. http://gdz.sub.uni-goettingen.de/no_cache/dms/load/img/?IDDOC=251917
- Karnezos, M. & Pendse, R., 2005. 3D Packaging Promises Performance, Reliability Gains with Small Footprints and Lower Profiles. *Chip Scale Review Magazine*. <http://www.chipscalereview.com/archives/0105/article.php?type=feature&article=f6>.
- Kim, D.-H. et al., 2008. Stretchable and Foldable Silicon Integrated Circuits. *Science*, 320, no. 5875 : p.507-511..
- Ko, H.C. et al., 2008. A hemispherical electronic eye camera based on compressible silicon optoelectronics. *Nature*, 454, no. 7205 : p.748-753.
- Lacour, S.P. et al., 2005. Stretchable Interconnects for Elastic Electronic Surfaces. *Proceedings of the IEEE*, 93, no. 8 : p.1459-1467.
- Nikzad, S. et al., 2003. Curved focal plane arrays. Dans *2003 IEEE Workshop on CCDs and Advanced Image Sensors*.

- Nikzad, S., Jones, T.J. & Hoenk, M.E., 2007. Curved Focal Plane Arrays for Compact, wide Field of View Optical Systems. *Curved Focal Plane Arrays for Compact, wide Field of View Optical Systems*, 2436 : p.22.
- O'Connor, P. et al., 2007. Technology of the LSST focal plane. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 582, no. 3 : p.902–909.
- Petersen, K.E., 1982. Silicon as a mechanical material. *Proceedings of the IEEE*, 70, no. 5 : p.420-457.
- Phasics, 2009. Lateral shearing interferometry. <http://www.phasicscorp.com/technology.html>
- Porteous, I.R., 2001. *Geometric differentiation: for the intelligence of curves and surfaces*, Cambridge University Press.
- Primot, J. & Sogno, L., 1995. Achromatic three-wave (or more) lateral shearing interferometer. *Journal of the Optical Society of America A*, 12, no. 12 : p.2679-2685.
- Reuss, R.H. et al., 2005. Macroelectronics: Perspectives on Technology and Applications. *Proceedings of the IEEE*, 93, no. 7 : p.1239-1256.
- Rogers, John A., Someya, T. & Huang, Y., 2010. Materials and Mechanics for Stretchable Electronics. *Science*, 327, no. 5973 : p.1603 -1607.
- Savastiouk, 2000. 3D stacked wafer level packaging. *Savastiouk* : p.23-34.
- Stoney, G.G., 1909. The Tension of Metallic Films Deposited by Electrolysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 82, no. 553 : p.172 -175.
- Street, R.A., Wong, W.S. & Lujan, R., 2009. Curved electronic pixel arrays using a cut and bend approach. *Journal of Applied Physics*, 105, no. 10 : p.104504.
- Swain, P., 2004. Curved CCD detector devices and arrays for multispectral astrophysical applications and terrestrial stereo panoramic cameras. Dans *Proceedings of SPIE. Optical and Infrared Detectors for Astronomy*. Glasgow, Scotland, United Kingdom, p. 281-301. <http://link.aip.org/link/?PSI/5499/281/1&Agg=doi>
- Taylor, M.E., 1996. *Partial Differential Equations II: Qualitative Studies of Linear Equations Corrected.*, Springer.
- Thomas, D.E., 1941. The measurement of stress by X-rays. *Journal of Scientific Instruments*, 18, no. 7 : p.135-138.
- Timoshenko, S. & Woinowsky-Krieger, S., 1961. *Théorie des plaques et coques*, Librairie Polytechnique Ch. Béranger.
- Wang, L. & Ast, D.G., 2003. Curved silicon Electronics. Dans *Material Research Society*.
- Wang, S. et al., 2009. Mechanics of hemispherical electronics. *Applied Physics Letters*, 95, no 18 : p.181912.

- Yoon, J. et al., 2007. The effect of coating in increasing the critical size of islands on a compliant substrate. *Applied Physics Letters*, 90, no. 21 : p.211912.
- Youssef, H., Ferrand, A., Calmon, P., et al., 2010. Methods to improve reliability of bulge test technique to extract mechanical properties of thin films. *Microelectronics Reliability*, 50, no. 9-11 : p.1888-1893.
- Youssef, H., Ferrand, A., Pons, P., et al., 2010. A new iterative algorithm for the solution for the load deflection square membranes. Dans *2010 11th International Conference on Thermal, Mechanical & Multi-Physics Simulation, and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*. 2010 11th International Conference on Thermal, Mechanical & Multi-Physics Simulation, and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE). IEEE : p. 1-5.
- Youssef, Hicham & Ferrand, André, 2011. Caractérisation mécanique de films minces par une méthode éléments finis recalée sur un test de gonflement *19ème Congrès Français de Mécanique*.

Chapitre C : La courbure de détecteurs

- Buschbeck, E.K., Ehmer, B. & Hoy, R.R., 2003. The unusual visual system of the Strepsiptera: external eye and neuropils. *Journal of Comparative Physiology A: Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 189, no. 8 : p.617-630..
- Destefanis, G.L., 1991. HgCdTe infrared diode arrays. *Semiconductor Science and Technology*, 6, no. 12C : p.C88-C92.
- Destefanis, G., 2006. Détecteurs: nouvelles technologies et nouveaux marchés. *Clefs CEA*, no. 54 : p.10-12.
- Druart, G. et al., 2009. Demonstration of an infrared microcamera inspired by Xenos peckii vision. *Applied Optics*, 48, no. 18 : p.3368-3374.
- El Gamal, A. & Eltoukhy, H., 2005. CMOS image sensors. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, 21, no. 3 : p.6- 20.
- Glassbrenner, C.J. & Slack, G.A., 1964. Thermal Conductivity of Silicon and Germanium from 3°K to the Melting Point. *Physical Review*, 134, no. 4A : p.A1058..
- Hansen, G.L., Schmit, J.L. & Casselman, T.N., 1982. Energy gap versus alloy composition and temperature in Hg_{1-x}Cd_xTe. *Journal of Applied Physics*, 53, no. 10 : p.7099-7101.
- Hu, S.M., 1982. Critical stress in silicon brittle fracture, and effect of ion implantation and other surface treatments. *Journal of Applied Physics*, 53, no. 5 : p.3576.
- ISP OPTICS, 2011. BK7 Schott Glass Properties.
<http://www.ispoptics.com/PDFs/PDFCatalog/page14.pdf>.

- Johansson, S., Ericson, F. & Schweitz, J.-A., 1989. Influence of surface coatings on elasticity, residual stresses, and fracture properties of silicon microelements. *Journal of Applied Physics*, 65, no. 1 : p.122.
- Kilby, J.S., 1976. Invention of the integrated circuit. *IEEE Transactions on electron devices*, 23, no. 7 : p.648–654.
- Ko, H.C. et al., 2009. Curvilinear Electronics Formed Using Silicon Membrane Circuits and Elastomeric Transfer Elements. *Small*, 5, no. 23 : p.2703-2709.
- Lasfargues, G. & Marion, F., 2007. *Projet AMIS Aminci isolé*, Rapport de projet - Challenge de l'innovation. CEA
- Marion, F. & Gravrand, O., 2008. METHOD FOR PRODUCING A MATRIX OF INDIVIDUAL ELECTRONIC COMPONENTS AND MATRIX PRODUCED THEREBY. Brevet : EP2038929.
- Microcertec S.A.S., J., 2011. Material Data Sheet: ceramics. http://www.microcertec.com/pdf/microcertec_materials_data_sheet.pdf.
- Minassian, C. et al., 2008. Uncooled amorphous silicon TEC-less 1/4 VGA IRFPA with 25 μm pixel-pitch for high volume applications. *Infrared Technology and Applications XXXIV, Proc. SPIE*, 6940.
- Schaller, R.R., Juin 1997. Moore's law: past, present and future. *IEEE Spectrum*, 34, no. 6 : p.52-59.
- Schuster, F. et al., 2011. Broadband terahertz imaging with highly sensitive silicon CMOS detectors. *Optics Express*, 19, no. 8 : p.7827-7832.
- ULIS, 2011. infrared detector, infrared imaging sensor - ulis-ir. <http://www.ulis-ir.com/>.
- Vedel, C. et al., 1999. Amorphous silicon based uncooled microbolometer IRFPA. Dans *Proc. SPIE*. 3698 : p. 276–283.
- Yang, Y. et al., 2009. Statistical analysis of the influence of thinning processes on the strength of silicon. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 1112

Chapitre D : Caractérisations optiques de bolomètres

- ISO 15529, 2010. Optique et photonique - Fonction de transfert optique - Principes de mesure de la fonction de transfert de modulation (MTF) des systèmes de formation d'image échantillonnés.

Conclusion

Avrutsky, I. et al., 2006. Concept of a miniature optical spectrometer using integrated optical and micro-optical components. *Applied Optics*, 45, no. 30 : p.7811-7817..

Ball Semiconductor.Inc, 2011. <http://www.ballsemi.com/>.

Huang, G.T., 2011. How's That Stretchy, Bendy Stuff Working Out for Ya? MC10 Looks to Turn Flexible Sensors and Solar Cells Into a Growth Business | Xconomy. *Xconomy Boston*. http://www.xconomy.com/boston/2011/07/12/how%E2%80%99s-that-stretchy-bendy-stuff-working-out-for-ya-mc10-looks-to-turn-flexible-sensors-and-solar-cells-into-a-growth-business/?single_page=true.

mc10, 2011. <http://mc10inc.com>.

Microcertec S.A.S., 2011. MICROCERTEC Advanced Ceramics for High-Tech Industries. <http://www.microcertec.com/>. <http://www.microcertec.com/fiche-materiaux-fr-6-nitru-re-d-aluminium-aln.html>.

Si dans les caméras actuelles, la règle est l'utilisation de matrices de photodétection planes, dans la nature, aucune surface focale n'est plane : la rétine est soit concave (œil humain), soit convexe (œil d'insecte). Ces architectures offrent deux solutions de miniaturisation et de simplification des systèmes de détection qui ont fait l'objet des travaux de cette thèse. La courbure concave du détecteur permet de supprimer l'aberration de courbure de champ, particulièrement présente dans les instruments à large champ. L'étude théorique de cette solution, étayée par des applications concrètes, a permis de démontrer la simplification des architectures accessible par cette approche, ainsi que les améliorations en termes de performances optiques. La courbure convexe permet, quant à elle, de miniaturiser les systèmes en s'inspirant de l'œil composé des petits invertébrés. Cette architecture, constituée de groupes de pixels reliés par une métallisation souple, a été réalisée sur une matrice de détecteurs infrarouge en CdHgTe ; les composants obtenus sont électriquement fonctionnels et comparables en termes de performances aux valeurs standards.

L'originalité du travail a porté sur la mise en forme sphérique de composants monocristallins et monolithiques dont la couche active n'est pas modifiée, permettant ainsi de produire des systèmes avec un taux de remplissage de 100%. Après une étude matériau de la souplesse d'échantillons de silicium amincis, le procédé de courbure a été transféré sur des circuits fonctionnels amincis : Si-CMOS et micro-bolomètres. La courbure concave des bolomètres a mené à la réalisation de deux caméras. La première, constituée de deux lentilles du commerce, a permis de comparer les systèmes composés de détecteurs plan et courbé. L'avantage optique de la courbure sur l'uniformité de la réponse impulsionnelle a été prouvé grâce aux mesures de la fonction de transfert de contrastes (FTC). Enfin, à l'image d'un œil humain, une caméra composée d'une seule lentille et d'un bolomètre courbé a été réalisée. La qualité des images obtenues ainsi que la FTC mesurée ont mis en évidence le potentiel des plans focaux courbés dans les systèmes ultra-compacts inenvisageables jusqu'à ce jour.

Mots clés :

Plan focal courbé ; miniaturisation ; aberration de courbure de champ ; bolomètres ; large champ ; caméra infrarouge

In animal kingdom, plane retina, on which are based our cameras, does not exist; the focal plane is either concave for human beings or convex in insects' eyes. Both curvatures offer original solutions to miniaturize and simplify the optical design, and both of them have been studied in this work. The concave curving of the focal plane suppresses one aberration, the field curvature, on which depends the image quality of large field of view instruments. Advantages in image quality and optical design have been studied by theoretical analysis and by real cases of instruments. The convex curvature results in a miniaturization achieved by reproducing the compound eye of small invertebrates. This design, which is composed of several groups of pixels interconnected by metallic lines, has been realized with cooled infrared detecting device. The performed detectors are still electrically functional with a comparable behaviour than conventional sensors.

The originality of this work is the spherical curvature of monocrystalline and monolithic components; the active layer is not modified for this purpose. The process of curvature has been developed on thinned square silicon bare dies and then transferred to thinned functional devices: Si-CMOS and micro-bolometers. The concave curvature of bolometers leads to the realization of two cameras. The first one, composed of two commercial lenses, was dedicated to the comparison between a planar traditional camera and a curved detector system. Optical advantages, and especially the response uniformity, have been proved thanks to measures of the contrast modulation function (CMF). Finally, I have realized an infrared eye composed of a unique lens and a curved concave bolometer. Both the image quality obtained and CMF experiments proved the interest of the curved focal plane in miniaturized optical systems.